

Août 2020

Évaluation socioéconomique du projet global Cigéo

Solution de référence de stockage géologique profond
retenue pour les déchets radioactifs de haute activité
et de moyenne activité à vie longue

Résumé non technique

Issus du secteur électronucléaire, de la recherche, de la défense, d'industries non-électronucléaires et du médical, les déchets radioactifs se distinguent en fonction de l'intensité et de la durée de leur activité.

Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ne représentent qu'environ 3 % des déchets radioactifs en volume, mais 99,8 % de la radioactivité des déchets radioactifs présents sur le territoire français. La gestion de ces déchets repose actuellement sur des solutions temporaires d'entreposage, qui bien qu'opérationnelles et sûres à l'échelle de quelques décennies, ne sont pas compatibles avec la durée de vie des déchets considérés, qui peut aller jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années. L'article L. 542-1 du code de l'environnement (1) indique que « *La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures.* » Ces déchets radioactifs sont donc en attente de leur mise en sécurité définitive, ne nécessitant plus l'intervention de l'homme.

Le centre de stockage Cigéo, fruit de plusieurs programmes de recherche et développement et d'un long processus législatif, est destiné à répondre à cet enjeu. « *Le stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde consiste à stocker des déchets radioactifs dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité¹. Les caractéristiques de la couche géologique visent à confiner les substances radioactives contenues dans ces déchets. Une telle installation de stockage [...] doit être conçue de telle sorte que la sûreté à long terme soit assurée de manière passive, c'est-à-dire sans dépendre d'actions humaines (comme des activités de surveillance ou de maintenance) [...]. Enfin, la profondeur des ouvrages de stockage doit être telle qu'ils ne puissent être affectés de façon significative par les phénomènes naturels externes attendus (érosion, changements climatiques, séismes...) ou par des activités humaines.* » (3).

La construction du centre de stockage Cigéo, sous réserve de l'obtention d'autorisation de création, est prévue dans une couche d'argile située à environ 500 mètres de profondeur, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne. Après une phase industrielle pilote, suivie de la mise en stockage progressive de l'ensemble des déchets MA-VL et HA produits et à produire par les installations nucléaires existantes, le centre de stockage Cigéo pourra être fermé : la couche géologique prendra alors le relais des actions de surveillance active, jusqu'ici prises en charge par la société, pour assurer le confinement des radionucléides et la protection de l'homme et de l'environnement.

L'objet du présent rapport est de procéder à l'évaluation socioéconomique du projet global Cigéo, solution de référence de stockage géologique profond pour la gestion à long terme des déchets radioactifs HA et MA-VL, retenue par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4).

L'évaluation socioéconomique, prévue par le décret n° 2013-1211 du 23 décembre 2013 (5), a pour but d'objectiver les coûts et les bénéfices de toutes natures (économique, sociale, environnementale) d'un projet. Elle permet ainsi de déterminer si les avantages d'un projet sont à la hauteur des coûts afférents. En l'espèce, le coût du centre de stockage Cigéo a été établi à 25 milliards d'euros (arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût objectif afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (6)).

Une telle évaluation se distingue d'une évaluation financière ou budgétaire, dans le sens où, d'une part, elle n'est pas limitée aux seuls flux financiers (dépenses et recettes) ; et où, d'autre part, elle procède d'un raisonnement « différentiel » entre une option dite « de projet » et une ou plusieurs autres options.

¹ La réversibilité d'un stockage géologique est défini dans la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (2). Elle se caractérise par la progressivité du développement de l'installation, sa flexibilité, son adaptabilité et par le caractère récupérable des colis de déchets radioactifs, en phase de fonctionnement.

Pour ce faire, la présente évaluation socioéconomique compare les coûts et les avantages du centre de stockage Cigéo (dite option de projet 1) à ceux des différentes options imaginées pour les besoins de l'évaluation socioéconomique (options 2, 3 et 4).

Les options considérées dans cette évaluation ont permis de s'interroger sur l'approfondissement d'efforts de recherche et développement (R&D) débouchant sur des solutions prospectives de mise en sécurité définitive. De telles solutions ont été schématisées *via* des technologies de densification et/ou de forage profond. D'autres solutions prospectives pourraient être envisagées, mais celles de la densification et du forage profond présentent l'intérêt d'être suffisamment documentées dans la littérature académique et suffisamment mûres pour imaginer qu'une période de R&D aurait des chances de déboucher sur une mise en œuvre de ces solutions technologiques dans des conditions de sûreté satisfaisantes. L'analyse a également conduit à envisager l'échec de la R&D en faveur de toute solution prospective de mise en sécurité définitive, le décalage de mise en œuvre du centre de stockage Cigéo, la perte du site de Meuse/Haute-Marne, ainsi que le maintien indéfini de l'intervention humaine dans la gestion des déchets radioactifs entreposés.

Des hypothèses structurantes ont été formulées pour chiffrer les coûts de ces options et estimer les risques qu'elles font, ou non, courir à la société. L'évaluation socioéconomique n'étant pas une étude d'ingénierie technico-économique, ces hypothèses ont été fondées sur la littérature académique, des rapports techniques et les documents officiels existants.

Par ailleurs, déployé très au-delà de notre siècle, le projet global Cigéo implique une évaluation sur un horizon temporel extraordinairement long, y compris par rapport aux projets d'infrastructures dont les durées les plus étendues sont de l'ordre de la centaine d'années (canaux, autoroutes, lignes ferroviaires, etc.).

L'inscription dans le temps lointain constitue à la fois une spécificité et une difficulté de cette évaluation socioéconomique. Pour prendre en compte ce temps exceptionnellement long, deux *scenarii* contrastés ont été modélisés, permettant de simuler le cadre macroéconomique dans lequel les différentes options pourraient voir le jour, et de considérer les incertitudes sur l'état de la société à très long terme :

- Un premier scénario (qualifié de « OK ») caractérise une société au sein de laquelle la croissance se poursuit, les institutions restent « en ordre de marche », les normes continuent d'évoluer vers plus de sûreté. Dans ce cadre, les exigences élevées de contrôle des déchets radioactifs sont préservées et les conséquences d'un accident restent maîtrisables.
- Un second scénario (qualifié de « KO ») représente une société plus chaotique : la croissance économique est érodée, puis nulle ; un cadre de gouvernance et des institutions progressivement fragilisés ne permettent plus, à terme, de préserver les normes de sécurité des installations. Cette dérive, dans un contexte où des conflits ne peuvent être exclus sur le temps long, augmente les risques d'accident.

L'inscription dans le temps lointain, en plus de la scénarisation sociétale contrastée qu'elle conduit à établir, a des incidences en matière d'actualisation des coûts et bénéfices. Dans les évaluations socioéconomiques traditionnelles intervenant dans un horizon plus proche et présentant des coûts et bénéfices généralement tangibles, le taux d'actualisation conventionnel (4,5 % jusqu'en 2070) amoindrit lourdement les effets du long terme, puisqu'en raison de la préférence pour le présent, de la croissance économique et du risque, un euro demain a une valeur plus faible qu'un euro aujourd'hui. Dans la présente évaluation socioéconomique, d'importantes variations de ce taux d'actualisation sont testées, pour refléter la préoccupation portée aux générations à venir, l'incertitude sur la croissance économique future, ainsi que les corrélations entre les flux du projet et le risque macroéconomique.

L'évaluation socioéconomique permet d'observer ainsi les résultats des différentes options dans chacun de ces *scenarii*, dont aucun n'est à exclure compte tenu des horizons temporels particulièrement lointains considérés dans cette évaluation et selon les taux d'actualisation envisagés.

Les résultats quantitatifs mis en évidence par cette évaluation socioéconomique peuvent être résumés comme suit :

- Les options modélisant la poursuite d'investissements dans de la R&D en vue de trouver une technologie prospective alternative au stockage géologique profond, combinés à la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo, visant à s'assurer que cette technologie et le site afférent soient toujours disponibles au cas où la R&D ne serait pas fructueuse (options 2 et 3), ressortent sans ambiguïté comme moins favorables que l'option de projet 1, qui modélise la mise en place du centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi.
- Les résultats sont plus nuancés lorsque la comparaison concerne l'option de projet 1 (centre de stockage Cigéo) avec l'option 4, qui comporte des branches menant à de l'entreposage de longue durée renouvelé. L'option 4 modélise le choix d'un décideur public qui considère un report des premiers investissements du centre de stockage Cigéo et qui lance à la place des investissements de R&D pour tenter de trouver une solution prospective alternative de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL. Le décideur public fait donc le choix de ne pas réaliser le projet du centre de stockage Cigéo dans l'immédiat, et accepte de faire face au double risque portant sur l'issue de la R&D et sur le maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne. Cette option est donc modélisée sous forme d'un arbre de décisions, envisageant les différentes éventualités, selon la réalisation ou non de ces risques. Il en résulte pour certaines branches une impossibilité de sortir d'une solution temporaire d'entreposage des déchets radioactifs, nécessitant de renouveler continuellement les sites actuels d'entreposage, alors même qu'une telle solution est supposée transitoire.

Les résultats de la comparaison de l'option de projet 1 avec l'option 4 sont décrits ci-après.

Dans le scénario KO, les résultats de l'évaluation socioéconomique sont constants, quelle que soit la valeur du taux d'actualisation retenue : le centre de stockage Cigéo est préférable. En effet, le centre de stockage Cigéo permet de se prémunir des conséquences économiques et sociales d'un hypothétique accident en entreposage (estimées dans cette étude de façon partielle et selon des hypothèses conservatrices²), accident susceptible de se produire dans une société où les normes de sûreté ne seraient plus respectées. C'est l'intérêt d'une solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, ne nécessitant plus d'actions de la part de l'homme et protégeant des menaces susceptibles d'émerger sur le très long terme.

Dans le scénario OK, les résultats de l'évaluation socioéconomique dépendent de la valeur prise par le taux d'actualisation. Dans ce scénario, le cadre macroéconomique est durablement favorable à la croissance et au respect des exigences de sûreté. En conséquence, les ordres de grandeur des conséquences probabilisées et actualisées d'un accident sont négligeables par rapport aux autres ordres de grandeur en jeu. Les comparaisons entre les options ne concernent donc que les coûts associés à leur mise en place.

Avec la borne basse du taux d'actualisation, la solution du centre de stockage Cigéo (option de projet 1) est toujours moins onéreuse que l'option 4, qui peut conduire à de l'entreposage de longue durée renouvelé. En effet, l'utilisation d'un taux d'actualisation bas, en limitant l'érosion des coûts et bénéfices survenant sur le temps long, est cohérente avec la vocation du centre de stockage Cigéo destiné à préserver les générations très lointaines des charges liées à la gestion active des déchets, nécessaires en cas d'entreposage.

En revanche, avec les taux d'actualisation intermédiaire et haut, c'est l'option 4 qui est en moyenne la plus favorable (avec un différentiel de coût actualisé relativement faible). A l'inverse du taux bas, ces taux d'actualisation plus élevés diminuent fortement la valeur des coûts et bénéfices futurs. Or la solution d'entreposage de longue durée renouvelé qui nécessite une surveillance active (comme c'est le cas actuellement) présente des coûts étalés dans le temps, alors que le centre de stockage Cigéo (option de projet 1) nécessite d'engager des dépenses élevées à brève échéance. L'utilisation de taux d'actualisation élevés souligne ainsi l'incidence forte de l'échéancier des dépenses.

Au total, dans quatre cas sur six, le modèle quantitatif d'évaluation socioéconomique met donc en évidence que l'option de projet 1 est préférable (dans le scénario KO avec les taux d'actualisation bas,

² A savoir, plutôt sous-évaluées.

intermédiaire et haut et dans le scénario OK avec un taux d'actualisation bas) ; tandis que dans deux cas sur six, l'option 4 est celle qui présente le coût global actualisé le plus faible (dans le scénario OK avec les taux d'actualisation intermédiaire et haut).

Pourtant, l'option de projet 1 et l'option 4 ne sont pas équivalentes en termes de service rendu : l'option de projet 1 répond à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, elle est à ce titre jugée sûre, ce qui n'est pas le cas de l'option 4 lorsqu'elle conduit à de l'entreposage de longue durée renouvelé *sine die*, qui la rend risquée.

Ces options ne sont donc pas pleinement comparables. Pour être pleinement comparables, il faudrait pouvoir tenir compte d'autres bénéfices liés à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, tels que le fait de se libérer de la crainte des répercussions d'une alternance de scénario avec le KO, ou du transfert des charges financières et morales liées aux enjeux de la gestion des déchets radioactifs (surveillance des colis et des sites d'entreposage, renouvellement des installations, réparation des colis endommagés ou usés, etc.) à des générations futures qui n'auront pas profité directement des avantages du nucléaire. Le modèle quantitatif d'évaluation socioéconomique ne permet pas de tenir compte de ces bénéfices, appelés « bénéfices assurantiels ». Pourtant, il semble bien que le décideur public de 2006, qui a privilégié la réalisation du centre de stockage Cigéo, plutôt que de poursuivre continuellement l'entreposage des déchets radioactifs, ait intégré à son choix ces bénéfices assurantiels, puisqu'il n'a pas choisi la solution présentant le coût global actualisé le plus faible.

Dès lors, un raisonnement qualitatif a été mobilisé, permettant de déduire un bénéfice assurantiel pivot. Celui-ci a été défini comme la prime additionnelle pivot à mettre au crédit de l'option jugée sûre, telle que cette dernière soit plus favorable qu'une option jugée risquée. Si le décideur public actuel, estime que les sociétés du futur auront, comme hier et aujourd'hui, une préférence pour les solutions de mise en sécurité définitive, alors il convient d'affecter une prime assurantielle aux branches et options permettant la mise en sécurité définitive. Si la valeur que représente cette assurance est au moins égale au bénéfice assurantiel pivot, alors l'option de projet 1 est moins onéreuse que l'option 4, et ce quel que soit le taux d'actualisation retenu et pour toutes les probabilités de survenue du scénario KO.

Par exemple, s'il est estimé que le scénario KO a 10 % de chances de survenir, et même si le taux d'actualisation haut ou intermédiaire est retenu, un décideur public qui estimerait à au moins 7,9 milliards d'euros le bénéfice assurantiel de la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs (soit 118 euros par habitant en un seul versement) devrait, selon les résultats de la présente évaluation socioéconomique, faire le choix de lancer le centre de stockage Cigéo.

► EN D'AUTRES TERMES :

- Cela revient à considérer que dans une société persuadée de sa stabilité perpétuelle (c'est-à-dire persuadée de la permanence d'un scénario OK), et priorisant l'intérêt de ses contemporains (c'est-à-dire écartant un taux d'actualisation faible) et qui, enfin, arbitre principalement en fonction des coûts (c'est-à-dire qui n'attribue pas de valeur suffisante au bénéfice assurantiel d'une solution de mise en sécurité définitive), le choix rationnel, mis en évidence par le calcul socioéconomique, consiste à renouveler continuellement l'entreposage des déchets radioactifs, transformant *de facto* une solution aujourd'hui considérée comme temporaire en une solution de long terme.
- *A contrario*, dès lors que l'éventualité d'une défaillance sociétale à long terme est considérée (c'est-à-dire que la survenue d'un scénario KO est prise en compte), ou que l'intérêt porté aux générations futures est suffisamment élevé (c'est-à-dire qu'un taux d'actualisation bas est retenu), ou que, à défaut, une valeur suffisante est accordée au bénéfice assurantiel lié à la mise en sécurité définitive, alors l'option de projet 1 de réalisation du centre de stockage Cigéo constitue la solution préconisée par la présente évaluation socioéconomique.

Les directions prises par cette étude, tant sur la modélisation des différentes options, que sur les évolutions sociétales et les choix de taux d'actualisation, visent à répondre au but de l'évaluation socioéconomique d'objectiver le champ des possibles. Le décideur public peut alors se baser sur des éléments quantifiés pour finaliser une décision éclairée.

Soulignons que cette évaluation socioéconomique a représenté une première pour les acteurs du secteur nucléaire et un défi méthodologique pour les économistes : celui de la prise en compte de l'incertitude et du risque dans un temps très long.

Même si la sensibilité des nombreuses hypothèses a été testée tout au long du processus d'évaluation, elles sont ouvertes à la discussion de la contre-expertise, ainsi que les résultats qui en découlent.

Sommaire

Introduction	17
1. Présentation de la méthode d'évaluation socioéconomique	25
1.1 <i>La démarche et le principe</i>	26
1.2 <i>Les particularités de l'analyse coûts-bénéfices</i>	27
1.2.1 Des évaluations en différentiel	27
1.2.2 La monétarisation	27
1.3 <i>Les indicateurs calculés</i>	28
1.4 <i>Les spécificités et limites de l'analyse coûts-bénéfices du projet global Cigéo</i>	29
1.4.1 L'incertitude liée à l'estimation des coûts et bénéfices des solutions étudiées	29
1.4.2 L'incertitude liée à la durée de vie du projet	30
1.4.3 L'incertitude relative à l'état de la société (scénarisation)	31
1.4.4 L'incertitude relative à la valorisation à long terme (taux d'actualisation et prime de risque)	32
2. Contexte et stratégie nationale	35
2.1 <i>L'origine de la production de déchets radioactifs</i>	36
2.2 <i>La gestion des déchets radioactifs : le contexte français</i>	38
2.3 <i>Le cas des déchets HA et MA-VL</i>	41
2.4 <i>Le choix du projet Cigéo, description et cheminement</i>	44
2.5 <i>La gestion des déchets HA et MA-VL à l'international : panorama</i>	49
3. Scenarii de référence et paramétrage du modèle	53
3.1 <i>Les quantités de déchets radioactifs</i>	54
3.2 <i>Deux possibles états du monde contrastés</i>	56
3.2.1 Le scénario « OK »	56
3.2.2 Le scénario « KO »	59
3.2.3 <i>Scenarii et prix relatifs</i>	63
3.3 <i>Valorisation du temps long et actualisation</i>	68
3.3.1 Actualisation : définition et discussion	68
3.3.2 Choix des taux d'actualisation utilisés au sein des scenarii de référence de l'évaluation	70
3.4 <i>Arbres de décision, aléas et critère de choix</i>	84
3.4.1 Arbre de décision	84
3.4.2 Introduction d'aléa	85
3.4.3 Simulation Monte Carlo	86
3.4.4 Critère de choix	86
4. Options de projet comparées	89
4.1 <i>Les modalités étudiées de gestion des déchets radioactifs</i>	91
4.1.1 La séparation/transmutation	91
4.1.2 L'entreposage de longue durée	92
4.1.3 Le forage profond	93

4.2	<i>Les options retenues et non retenues en bref</i>	95
4.3	<i>Option de projet 1 : le centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra</i>	96
4.4	<i>Option 2 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA</i>	98
4.5	<i>Option 3 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL</i>	100
4.6	<i>Option 4 : efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL sans investissement dans le centre de stockage Cigéo</i>	104
5.	Quantification des coûts des différentes options	109
5.1	<i>Coûts unitaires, prix relatifs, aléas et probabilité</i>	110
5.1.1	Coût de mise en place de Cigéo	110
5.1.2	Coût de R&D	118
5.1.3	Coût de recherche de site	118
5.1.4	Coût d'une technologie prospective pour les déchets HA	126
5.1.5	Coût d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL	130
5.1.6	Coût d'entreposage	134
5.1.7	Coût de transport	136
5.1.8	Coût des GIP	137
5.1.9	Coût de maintien des compétences	137
5.1.10	Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne	138
5.1.11	Récapitulatif des coûts unitaires	139
5.1.12	Aléas sur les coûts unitaires	140
5.1.13	Probabilité de succès des recherches et de perte de site	141
5.2	<i>Coût de l'option de projet 1</i>	142
5.2.1	Coût brut de l'option de projet 1	142
5.2.2	Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option de projet 1	145
5.2.3	Prise en compte des prix relatifs dans les coûts l'option de projet 1	145
5.2.4	Coût actualisé de l'option de projet 1	147
5.3	<i>Coût de l'option 2</i>	149
5.3.1	Coût brut de l'option 2	149
5.3.2	Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option 2 et de l'évolution des prix relatifs	152
5.3.3	Coût actualisé de l'option 2 et espérance	153
5.3.4	Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1	155
5.4	<i>Coût de l'option 3</i>	156
5.4.1	Coût brut de l'option 3	157
5.4.2	Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option 3 et de l'évolution des prix relatifs	160
5.4.3	Coût actualisé de l'option 3 et espérance	160
5.4.4	Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1	162
5.5	<i>Coût de l'option 4</i>	163
5.5.1	Coût brut de l'option 4	164
5.5.2	Coût actualisé de l'option 4 et espérance, après prise en compte du risque d'aléas sur les coûts, de l'évolution des prix	171
5.5.3	Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1	177
5.6	<i>Récapitulatif du coût des options</i>	178
5.6.1	Scénario OK	178
5.6.2	Scénario KO	179

6.	Quantification des bénéfices et risques évités par les différentes options	181
6.1	<i>Propos préliminaires et présentation de la démarche de sûreté du centre de stockage Cigéo</i>	184
6.1.1	Les risques en phase d'entreposage	185
6.1.2	Les risques associés au transport des déchets radioactifs	186
6.1.3	Les risques pris en compte pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo	187
6.1.4	La sûreté après la fermeture du centre de stockage Cigéo	188
6.2	<i>Hypothèses de sûreté des autres options</i>	188
6.3	<i>Analyse différentielle qualitative des périodes de risque, selon les scenarii</i>	189
6.4	<i>Définition des périmètres d'intervention et de l'accident à considérer</i>	191
6.4.1	Périmètres extrapolables issus d'un bref rappel des accidents nucléaires	191
6.4.2	Caractérisation de l'accident imaginé dans l'évaluation socioéconomique : incendie suite à l'abandon d'une installation d'entreposage	194
6.4.3	Définition des périmètres d'intervention suite à un accident	195
6.4.4	Application de ces périmètres aux sites d'entreposage actuels	198
6.5	<i>Coûts unitaires de l'incendie sur un site d'entreposage imaginé</i>	201
6.5.1	Coût des réfugiés	201
6.5.2	Remédiation : les coûts de décontamination	201
6.5.3	Les coûts de prise en charge des déchets radioactifs générés par les mesures de décontamination	202
6.5.4	Coût d'image, coût économique direct et de ressenti	206
6.5.5	Coût sanitaire	207
6.5.6	Récapitulatif des coûts unitaires de l'incendie imaginé sur un site d'entreposage	208
6.5.7	Coût brut appliqué au cas de Marcoule	208
6.5.8	Coût brut appliqué au cas de La Hague	209
6.5.9	Aléa entourant les coûts unitaires de l'accident	209
6.6	<i>Scenarii, probabilités et conséquences d'un incendie en entreposage</i>	209
6.6.1	Intégration du risque d'accident dans le scénario KO	209
6.6.2	Comparaison avec l'option de projet 1	215
7.	Résultats de l'évaluation socioéconomique, mise en perspective et recommandations	219
7.1	<i>Recueil quantitatif des résultats de l'évaluation socioéconomique</i>	224
7.1.1	Résultats dans le scénario OK	224
7.1.2	Résultats dans le scénario KO	228
7.1.3	Date de réalisation du centre de stockage Cigéo	231
7.2	<i>Discussion et mise en perspective des résultats de l'évaluation socioéconomique</i>	232
7.2.1	Discussion concernant les résultats quantitatifs	232
7.2.2	Le bénéfice assurantiel du centre de stockage Cigéo	233
7.2.3	Synthèse des résultats de l'évaluation socioéconomique et de sa mise en perspective	239
7.3	<i>Observations finales et recommandations sur l'évaluation socioéconomique appliquée à la gestion des déchets radioactifs</i>	241
	Annexes	243
	<i>Annexe 1 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Allemagne</i>	244

1.1	Contexte national	244
1.1.1	Politique énergétique	244
1.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	244
1.2	Sources, types et quantités de déchets	245
1.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	245
1.3.1	Solutions de gestion actuelle	245
1.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	245
1.3.3	Alternatives envisagées	246
1.4	Modalités de financement	246
	Annexe 2 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Belgique	247
2.1	Contexte national	247
2.1.1	Politique énergétique	247
2.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	247
2.2	Sources, types et quantités de déchets	248
2.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	248
2.3.1	Solutions de gestion actuelle	248
2.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité (types B et C)	249
2.3.3	Alternatives envisagées	249
2.4	Modalités de financement	250
	Annexe 3 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Canada	251
3.1	Contexte national	251
3.1.1	Politique énergétique	251
3.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	251
3.2	Sources, types et quantités de déchets	252
3.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	252
3.3.1	Solutions de gestion actuelle	252
3.3.2	Projet de stockage des déchets de faible à moyenne activité à vie longue	253
3.3.3	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute activité	253
3.4	Modalités de financement	254
	Annexe 4 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Chine	255
4.1	Contexte national	255
4.1.1	Politique énergétique	255
4.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	255
4.2	Sources, types et quantités de déchets	256
4.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	256
4.3.1	Solutions de gestion actuelle	256
4.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	257
4.3.3	Alternatives envisagées	257
4.4	Modalités de financement	258
	Annexe 5 Gestion des déchets de type HA et MA-VL et en Espagne	259
5.1	Contexte national	259
5.1.1	Politique énergétique	259
5.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	259
5.2	Sources, types et quantités de déchets	260
5.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	260
5.3.1	Solutions de gestion actuelle	260

5.3.2	Solution de gestion temporaire envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	261
5.3.3	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	261
5.3.4	Alternatives envisagées	262
5.4	Modalités de financement	262
Annexe 6 Gestion des déchets de type HA et MA-VL aux États-Unis d'Amérique		263
6.1	Contexte national	263
6.1.1	Politique énergétique	263
6.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	263
6.2	Sources et types de déchets	264
6.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	264
6.3.1	Solutions de gestion actuelle	264
6.3.2	Solution de gestion définitive envisagée	265
6.4	Modalités de financement	266
Annexe 7 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Finlande		267
7.1	Contexte national	267
7.1.1	Politique énergétique	267
7.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	267
7.2	Sources, types et quantités de déchets	267
7.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	268
7.3.1	Solutions de gestion actuelle	268
7.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	268
7.3.3	Alternatives envisagées	268
7.4	Modalités de financement	269
Annexe 8 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Japon		270
8.1	Contexte national	270
8.1.1	Politique énergétique	270
8.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	270
8.2	Sources, types et quantités de déchets	271
8.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	272
8.3.1	Solutions de gestion actuelle	272
8.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute activité	272
8.4	Modalités de financement	273
Annexe 9 Gestion des déchets de type HA et MA-VL aux Pays-Bas		274
9.1	Contexte national	274
9.1.1	Politique énergétique	274
9.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	274
9.2	Sources, types et quantités de déchets	274
9.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	275
9.3.1	Solutions de gestion actuelle	275
9.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets radioactifs	275
9.3.3	Alternatives envisagées	276
9.4	Modalités de financement	276
Annexe 10 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Royaume-Uni		277
10.1	Contexte national	277
10.1.1	Politique énergétique	277
10.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	277

10.2	Sources, types et quantités de déchets	278
10.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	279
10.3.1	Solutions de gestion actuelle	279
10.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	279
10.3.3	Alternatives envisagées	279
10.4	Modalités de financement	279
Annexe 11 Gestion des déchets de type HA et MA-VL et en Russie		281
11.1	Contexte national	281
11.1.1	Politique énergétique	281
11.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	281
11.2	Sources, types et quantités de déchets	281
11.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	282
11.3.1	Solutions de gestion actuelle	282
11.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	282
11.3.3	Alternatives envisagées	283
11.4	Modalités de financement	283
Annexe 12 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Suède		284
12.1	Contexte national	284
12.1.1	Politique énergétique	284
12.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	284
12.2	Sources, types et quantités de déchets	284
12.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	285
12.3.1	Solutions de gestion actuelle	285
12.3.2	Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité	285
12.3.3	Alternatives envisagées	286
12.4	Modalités de financement	286
Annexe 13 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Suisse		288
13.1	Contexte national	288
13.1.1	Politique énergétique	288
13.1.2	Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs	288
13.2	Sources, types et quantités de déchets	289
13.3	Solutions de gestion des déchets radioactifs	289
13.3.1	Solutions de gestion actuelle	290
13.3.2	Solution de gestion définitive envisagée	290
13.4	Modalités de financement	291
Annexe 14 Fondement théorique sur le taux d'actualisation		292
14.1	Cadre théorique et appliqué du taux sans risque	292
14.1.1	Formule de Ramsey et effet richesse	292
14.1.2	Taux de préférence pure pour le présent	293
14.1.3	Formule de Ramsey étendue	294
14.1.4	Prise en compte d'évènements extrêmes	294
14.1.5	Estimation du taux sans risque	295
14.2	Cadre théorique de la prime de risque	295
Annexe 15 Détails des coûts et représentations graphiques de l'option de projet 1		298
15.1	Hypothèses de l'option de projet 1	298
15.2	Coût de l'option de projet 1 avec prise en compte des prix relatifs	299
15.2.1	Approche déterministe, scénario OK	299
15.2.2	Approche déterministe, scénario KO	299

15.2.3	Approche probabiliste non actualisée, scénario OK	300
15.2.4	Approche probabiliste non actualisée, scénario KO	300
15.3	Coût actualisé de l'option de projet 1	301
15.3.1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	301
15.3.2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO	303
Annexe 16 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 2		305
16.1	Hypothèses de l'option 2	305
16.2	Coûts unitaires de l'option 2	307
16.2.1	Coût de mise en place de Cigéo	307
16.2.2	Coût de transport	309
16.2.3	Coût d'entreposage	310
16.2.4	Coût de recherche de site	310
16.2.5	Coût de R&D	311
16.2.6	La recherche n'est alors jugée fructueuse que si la technologie prospective trouvée est conforme au niveau de sûreté français et si un site est trouvé pour la recevoir. Coût d'une technologie prospective	311
16.3	Coût de l'option 2 avec prise en compte des prix relatifs	313
16.4	Coût actualisé de l'option 2	315
16.4.1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	315
16.4.2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO	317
Annexe 17 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 3		319
17.1	Hypothèses de l'option 3	319
17.2	Coûts unitaires de l'option 3	322
17.2.1	Coût de mise en place de Cigéo	322
17.2.2	Coût de transport	328
17.2.3	Coût d'entreposage	331
17.2.4	Coût de R&D	332
17.2.5	Coût de recherche de site	332
17.2.6	Coût de technologie prospective	332
17.3	Coût actualisé de l'option 3	335
17.3.1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	335
17.3.2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO	337
Annexe 18 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 4		340
18.1	Hypothèses de l'option 4	340
18.2	Coûts unitaires de l'option 4	348
18.2.1	Coût de R&D	348
18.2.2	Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne	348
18.2.3	Coût de maintien des compétences	349
18.2.4	Coût de recherche de site	349
18.2.5	Coût de mise en place de Cigéo	351
18.2.6	Coût de technologie prospective	356
18.2.7	Coût de transport	357
18.2.8	Coût d'entreposage	360
18.3	Coût actualisé de l'option 4	368
18.3.1	Probabilité d'occurrence des branches de l'option 4	369
18.3.2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	370
18.3.3	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident	372
18.3.4	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec prise en compte du risque d'accident	374
18.4	Prise en compte de la valeur d'option au sein de l'option 4	376
18.4.1	Construction du modèle et critère de décision sans valeur d'option	376
18.4.2	Construction du modèle et critère de décision avec valeur d'option	377
18.4.3	Résultats en scénario OK	379
18.4.4	Résultats en scénario KO	381

<i>Annexe 19</i>	<i>Détail des coûts et représentation graphique des variantes de l'option de projet 1</i>	384
19.1	Coûts unitaires des variantes de l'option de projet 1	384
19.1.1	Coût de mise en place de Cigéo	384
19.1.2	Coût de GIP	384
19.1.3	Coût de transport	384
19.1.4	Coût de maintien du site	385
19.1.5	Coût de maintien des compétences	385
19.1.6	Coût d'entreposage	385
19.2	Coût brut des variantes de l'option de projet 1	385
19.3	Représentation graphique des variantes de l'option de projet 1	386
<i>Annexe 20</i>	<i>Détail du calcul du bénéfice assurantiel</i>	387
Tables des illustrations		389
Références bibliographiques		400

Introduction

Découverte par hasard en 1896 par Antoine-Henri Becquerel, la radioactivité désigne le phénomène physique par lequel des noyaux atomiques instables (radionucléides) se transforment en d'autres atomes, en émettant simultanément des particules et des rayonnements, c'est-à-dire de l'énergie. Après de nombreuses études sur les propriétés de ces rayonnements, Marie Curie invente le nom de « radioactivité » (issu du mot latin *radius*, qui signifie rayon).

Près de 40 ans plus tard, en 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle. C'est un tournant dans l'histoire de la physique nucléaire, qui marque le début d'importants programmes de recherche sur l'énergie nucléaire.

Une des premières applications du nucléaire est militaire, avec le développement pendant la seconde guerre mondiale de la bombe atomique utilisée en 1945 à Hiroshima et Nagasaki, puis ensuite en tant qu'élément central de la stratégie de dissuasion.

Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que le nucléaire civil se développe, pour produire notamment de l'électricité (États-Unis d'Amérique, URSS). En France, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) est créé en 1945 ; le premier réacteur est mis en service en 1956 ; à partir des années 60, le nucléaire entre dans une phase industrielle, soutenu par un objectif de renforcement de l'indépendance énergétique dans le contexte de crises pétrolières. En 2018, 37 pays dans le monde exploitent 452 réacteurs nucléaires, produisant plus de 10 % de l'électricité mondiale (Agence internationale de l'énergie (7)). Dans l'Union européenne, 14 des 28 pays exploitent au moins une centrale. En 2018, plus de 25 % de l'électricité produite dans l'Union était d'origine nucléaire (Eurostat). En France enfin, environ 70 % de l'électricité est produite par le nucléaire, sur la base d'un parc constitué de 58 réacteurs nucléaires répartis sur 19 sites.

Mais le nucléaire ne sert pas uniquement à la production d'électricité. Le nucléaire est aujourd'hui aussi utilisé dans le domaine médical pour la réalisation de radiographies et le traitement thérapeutique de certaines maladies, dans le domaine agricole, pour la protection des cultures et la conservation des aliments, dans le domaine industriel pour le contrôle des soudures ; il est également largement utilisé dans les secteurs de la recherche et de la défense.

D'un point de vue sociétal, le nucléaire continue de susciter des inquiétudes. Les accidents de *Three Mile Island* en 1979, de *Tchernobyl* en 1986 et de *Fukushima* en 2011 ont eu un impact considérable sur les opinions publiques et sur l'acceptation du nucléaire : les questions couramment évoquées portent principalement sur la sûreté et la sécurité des installations, et sur la gestion des déchets radioactifs.

Le 25 septembre 2019 s'est clôturé le débat public sur le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) 2019-2021. Pendant 6 mois, la Commission particulière du débat public (CPDP) mise en place à cet effet a veillé à ce que toutes les parties prenantes puissent s'exprimer sur tous les aspects du plan. En amont du débat, la CPDP avait identifié deux sujets d'intérêt portant sur la gestion des déchets HA et MA-VL, sur lesquels l'expertise technique de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a été sollicitée. C'est sur cet enjeu de gestion des déchets HA et MA-VL que porte le présent rapport. La CPDP a relevé quatre grandes préoccupations relatives à la gestion des déchets radioactifs entendues lors du débat public : la réalité de la réversibilité du centre de stockage Cigéo, la sûreté du stockage, la prise en compte de l'intérêt des générations futures et le coût du futur projet.

L'Inventaire national des matières et déchets radioactifs réalisé par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) rend public l'état des stocks, la provenance et la localisation de l'ensemble des matières et déchets radioactifs présents en France. Le dernier inventaire fait état de plus de 1,6 millions de mètres cubes de déchets radioactifs existants au 31 décembre 2017. Plusieurs types de déchets composent cet inventaire. Ils sont classés selon deux critères :

Introduction

- le niveau d'activité, c'est-à-dire l'intensité du rayonnement émis, ce qui conditionne l'importance des protections à mettre en place pour se protéger de la radioactivité ;
- la période radioactive des produits contenus, qui permet de définir la durée de leur nuisance potentielle.

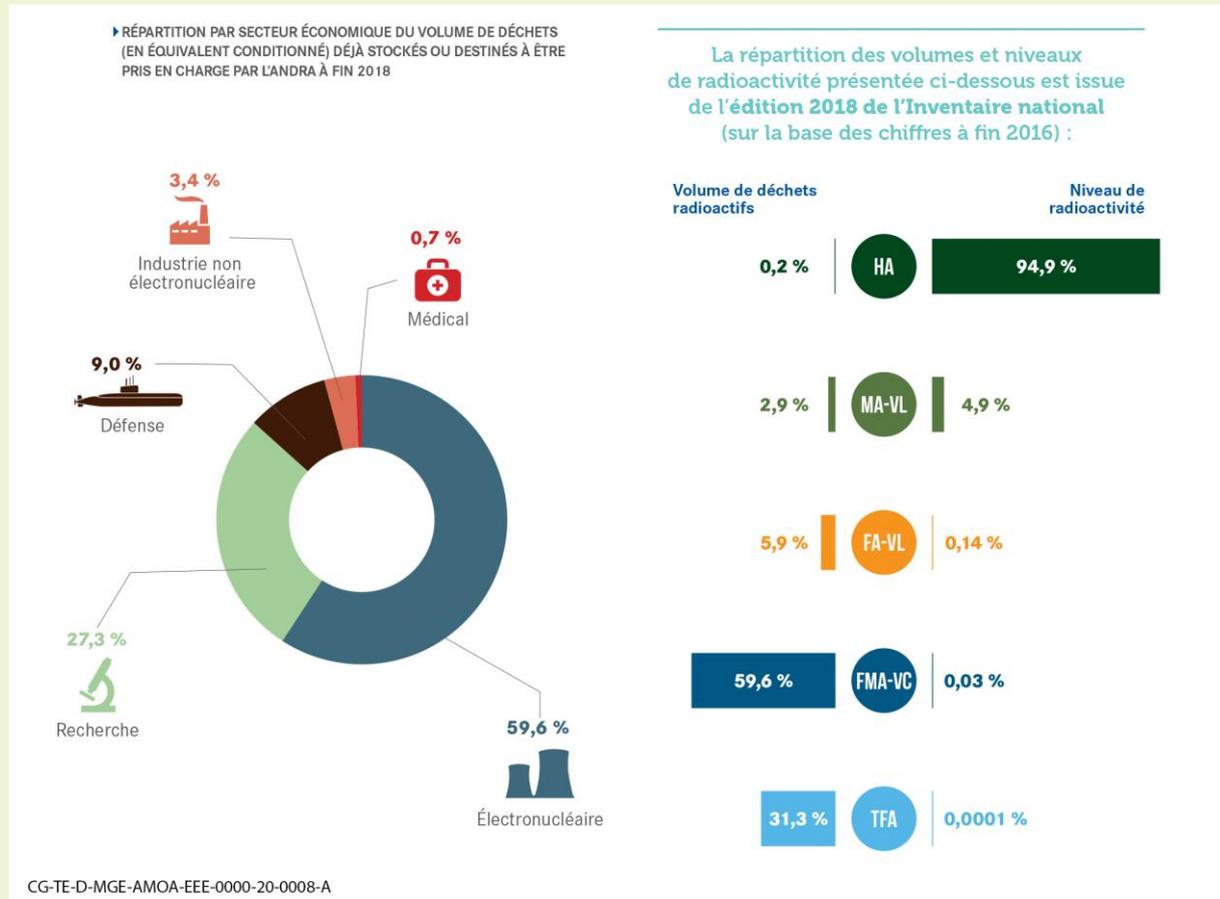
Cette classification permet schématiquement d'associer à chaque catégorie de déchets une ou plusieurs filières de gestion, comme présenté dans le tableau ci-dessous :

CATÉGORIE	Déchets dits à vie très courte contenant des radionucléides de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période ≤ 31 ans	Déchets dits à vie longue dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	 Stockage à faible profondeur à l'étude dans le cadre de l'article 4 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Faible activité (FA)			
Moyenne activité (MA)		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage profond à l'étude dans le cadre de l'article 3 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Haute activité (HA)	Non applicable		

CG-TE-D-MGE-AMOA-CM0-0000-18-0009-A

Classification usuelle des déchets radioactifs (8)

La figure ci-après concerne les stocks de déchets radioactifs à fin 2018 selon les secteurs économiques, les volumes et les niveaux de radioactivité.



Stocks de déchets radioactifs à fin 2018 (9)

Environ 30 % du volume de déchets est de très faible activité (TFA). Ces déchets sont stockés dans une installation spécifique, le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de l'Aube. En raison de la très faible radioactivité de ces déchets, le Cires a pu être construit en surface.

Les déchets de faible et moyenne activité et à vie courte (FMA-VC) représentent 60 % du volume total de déchets radioactifs. Les FMA-VC sont majoritairement des petits équipements contaminés lors de la maintenance et le fonctionnement des installations nucléaires françaises. Ils proviennent également de laboratoires de recherche, d'hôpitaux ou d'opérations d'assainissement et de démantèlement. Ces déchets contiennent essentiellement des radionucléides à période radioactive courte, c'est-à-dire inférieure ou égale à 31 ans. Ces déchets sont généralement compactés, puis conditionnés dans un fût en métal ou en béton, avant de pouvoir être stockés dans un centre adapté, le Centre de stockage de l'Aube (CSA). Ils présentent un très faible risque radiologique résiduel pour l'homme et l'environnement au bout de 300 ans³, du fait de la décroissance radioactive.

Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) représentent 6 % du volume total de déchets radioactifs. Depuis quelques années, l'Andra étudie la possibilité de construire un centre de stockage à faible profondeur pour ces déchets. En attendant, les colis FA-VL déjà produits sont entreposés⁴ dans des installations spécifiques.

Enfin, les déchets objets de cette évaluation sont les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), qui représentent à peine plus de 3 % du volume de déchets répertoriés à

³ Après 300 ans, la radioactivité de ces déchets a diminué d'un facteur 2^{10} , c'est à dire qu'elle est divisée par plus de 1000.

⁴ L'entreposage se distingue du stockage, au sens où il est temporaire. Ce n'est pas une solution définitive. L'entreposage nécessite une surveillance active.

l'inventaire. Si leur volume est relativement faible, leur niveau de radioactivité et leur durée de vie sont élevés : jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années pour les déchets HA et MA-VL. Les déchets HA concentrent à eux seuls 94,9 % de la radioactivité des déchets radioactifs français.

Ils sont essentiellement issus des combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires actuels (résidus non réutilisables obtenus lors du traitement permettant de recycler le plutonium et l'uranium contenus dans ces combustibles usés) et du fonctionnement des installations nucléaires⁵.

Non valorisables, ces déchets, une fois produits, sont entreposés de manière temporaire dans des installations spécifiques sur les sites de production, essentiellement sur le site Orano de La Hague, les centres du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Marcoule, de Cadarache et de Valduc et prochainement dans l'installation temporaire d'EDF, appelée ICEDA pour installation de conditionnement et d'entreposage de déchets activés, sur le site de la centrale du Bugey.

Les sites d'entreposage nécessitent la surveillance active par l'homme des déchets radioactifs et des installations, ainsi que le renouvellement des entrepôts et la reprise des colis primaires usés ou abimés. C'est la raison pour laquelle l'entreposage est qualifié de solution temporaire de gestion active, par opposition à des solutions de gestion passive avec mise en sécurité définitive. Ces dernières ont fait l'objet de plusieurs programmes de recherche et développement ces 25 dernières années. C'est finalement une solution de mise en sécurité définitive de stockage en couche géologique profonde qui a été retenue en 2006, à l'issue d'un long processus législatif. C'est ainsi que Cigéo (pour Centre industriel de stockage géologique) est né, centre de stockage à implanter dans une couche d'argile située à environ 500 mètres de profondeur. Le centre doit être construit à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, au sein d'une couche d'argile, datant du Callovo-Oxfordien, qui présente des caractéristiques de stabilité et d'imperméabilité notamment, favorables au confinement des éléments radioactifs et au stockage profond de déchets radioactifs.

Le centre de stockage Cigéo est prévu sur une période supérieure au siècle, selon un phasage, nécessairement schématisé dans cette évaluation socioéconomique, de la manière suivante : après des travaux d'aménagements préalables, l'obtention du décret d'autorisation de création conditionne le démarrage des travaux de construction initiale. Une phase industrielle pilote débute lors de la construction initiale et se poursuit jusqu'à l'obtention de la mise en service et quelques années de fonctionnement ; elle comporte des essais en inactif (sans colis de déchets radioactifs) puis après obtention de l'autorisation de mise en service, suivent des essais en actif (avec des colis de déchets radioactifs), visant à confirmer le fonctionnement en conditions réelles. Sur la base d'un bilan de la phase industrielle pilote permettant de fixer les conditions de sortie de cette phase et d'une loi adaptant les conditions de poursuite du fonctionnement (date estimée dans cette évaluation vers 2040), le passage en phase de fonctionnement permettra le stockage des colis de déchets MA-VL puis HA sur le centre de stockage Cigéo jusqu'en 2145, dont l'acheminement est prévu par voie ferrée et par route. Les déchets MA-VL et HA représentent un peu plus de 200 000 colis. Pendant la phase de fonctionnement, le stockage géologique est dit réversible : il restera possible de revenir sur des choix antérieurs grâce à la progressivité, à la flexibilité et à l'adaptabilité avec lesquelles l'installation est conçue ; de plus les colis de déchets seront récupérables, ce qui signifie qu'ils peuvent être retirés du centre de stockage Cigéo. Après cette date, le centre de stockage Cigéo est fermé. La couche géologique prend alors le relais des actions de surveillance active de l'homme, pour assurer le confinement des radionucléides et la protection de l'homme et de l'environnement.

Le coût afférent à la mise en place de la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue a été initialement estimé à environ 35 milliards d'euros par l'Andra puis optimisé. Le ministère chargé de l'Énergie a arrêté en janvier 2016 le chiffre de 25 milliards d'euros (Direction générale énergie climat) sur la période 2016-2156.

Le financement de ce projet est assuré par les producteurs responsables de leurs déchets, selon le principe du pollueur-payeur inscrit dans la loi. Ces derniers constituent en conséquence des provisions

⁵ Il s'agit principalement des internes de cuve activés lors du fonctionnement des centrales voire de certaines parties de la cuve fortement exposées au flux neutronique. Ce sont des MA-VL. Certains composants d'ITER (bobines activées) rentrent également ici.

contrôlées par les ministères chargés de l'Économie et de l'Énergie, selon une clé de répartition⁶ historique (10) définie en 2000 et appliquée aujourd'hui aux coûts de recherche et de conception relatifs au stockage géologique : EDF 78 %, le CEA⁷ 17 % et Orano 5 %. Cette clé de répartition entre les trois producteurs a vocation à être rediscutée entre l'État et les producteurs dès la fin de la phase actuelle de conception initiale du centre de stockage Cigéo.

L'évaluation socioéconomique de ce projet d'investissement répond à :

- Une obligation réglementaire : conformément au décret n° 2013-1211 du 23 décembre 2013 (5), toutes les opérations dont le financement apporté par l'état et ses établissements publics (ici au travers du CEA), dépasse les 20 millions d'euros, doivent procéder à une évaluation socioéconomique préalable. Le décret stipule également que pour les opérations dont l'investissement est supérieur à 100 millions d'euros, une contre-expertise indépendante doit être réalisée, pilotée par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI).
- Un questionnement sur l'intérêt social du projet ou de l'une de ses variantes : en période budgétaire contrainte, seuls les projets les plus créateurs de valeur doivent être lancés. Au-delà de la logique budgétaire et en dépassant les dogmes, l'évaluation socioéconomique permet de quantifier et d'objectiver les impacts socioéconomiques du projet, c'est-à-dire l'ensemble de ses coûts, mais aussi de ses bénéfices ou des éventuels coûts économiques, sanitaires ou environnementaux qu'il permet d'éviter. Cela en fait un outil de dialogue.
- Un intérêt en vue d'aiguiller les choix opérationnels : la réalisation d'une évaluation en phase amont des opérations permet de mobiliser les résultats et les préconisations du rapport d'évaluation dans la mise en œuvre ou non des opérations et leur aménagement.

La démarche de l'évaluation socioéconomique permet de répondre à deux questions fondamentales :

- 1. À quoi sert le projet ?**
- 2. Le projet est-il suffisamment créateur de valeur « socioéconomique » sur le temps long, au regard de ce qu'il coûte à la collectivité ?**

Il s'agit dès lors d'une analyse coût-bénéfice, qui intègre, outre la dimension financière, des impacts d'autres natures, comme des impacts environnementaux et sociaux. L'évaluation socioéconomique est une évaluation en différentiel : en d'autres termes, elle nécessite de comparer les coûts et bénéfices du projet avec les coûts et bénéfices de variantes du projet ou de l'absence de projet.

Dans un secteur nucléaire marqué par une culture de sûreté et un cadre législatif spécifiques, l'évaluation socioéconomique du projet Cigéo complète l'approche :

- Bien que le principe du stockage en couche géologique profonde ait été acté par la loi, la réalisation de l'évaluation socioéconomique du centre de stockage Cigéo a nécessité de comparer cette solution de gestion des déchets avec des solutions prospectives, pour lesquelles un chiffrage a dû être réalisé. La solution prospective de stockage des déchets la plus vraisemblable est apparue être la technologie de stockage en forage profond (*deep borehole*). Ce choix s'est justifié par la publication de l'IRSN traitant du « Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue », édité dans le cadre du débat public sur le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) et par des études américaines. De la même façon, l'évaluation a conduit à étudier les conséquences d'un *statu quo*, c'est-à-dire d'un entreposage de très longue durée, nécessitant la surveillance de l'homme. Il est apparu nécessaire d'ouvrir le champ des possibles, en s'éloignant parfois du cadre légal, ce qui est une pratique courante des évaluations socioéconomiques. Comme il n'existe pas d'étude d'ingénierie technico-économique des solutions prospectives envisagées dans certaines options, les rapports publics existants ont été utilisés pour en élaborer un chiffrage.

⁶ Cette clé de répartition ne concerne pas tous les coûts, ce qui est sans incidence sur les résultats de l'évaluation socioéconomique.

⁷ Le CEA est un organisme public de recherche à caractère scientifique, technique et industriel.

- Comme dans toute activité humaine, le risque zéro n'existe pas dans l'industrie nucléaire. Ainsi, l'objectif de la démarche de sûreté est de prévenir les risques d'accident et d'en limiter les conséquences dans l'hypothèse où l'accident surviendrait quand même : une fois les objectifs de sûreté définis, des défaillances possibles sont imaginées (séisme, perte d'alimentation électrique, attaque extérieure, etc.) et le comportement de l'installation est simulé. La démarche de sûreté permet de déterminer les mesures (diversité de barrières étanches par exemple) visant à exclure l'événement ou à s'assurer que les conséquences extérieures soient limitées et acceptables. Mais cette logique est orthogonale à celle de l'évaluation socioéconomique, qui implique de quantifier les conséquences de ce qu'il pourrait se passer de meilleur comme de pire. La présente évaluation a donc requis d'estimer les conséquences d'un accident, comme par exemple un incendie en entreposage dans une société chaotique, dans laquelle les mesures du maintien et de réduction des conséquences ne soient plus opérantes.

Enfin, si l'évaluation socioéconomique a impliqué une approche nouvelle dans la filière nucléaire, elle a également représenté un formidable terrain de recherche-action et un défi pour l'analyse économique. C'est l'exercice le plus complet d'évaluation socioéconomique connue sur la gestion des déchets radioactifs. Pour les raisons exposées précédemment, la formulation d'hypothèses a été nécessaire tout au long de l'évaluation pour quantifier coûts et risques des différentes options. La prise en compte de risques difficiles à quantifier (en termes aussi bien de probabilités que de conséquences), a constitué un défi pour l'évaluation socioéconomique, que des raisonnements en termes d'ordres de grandeur et des *scenarii* stylisés ont tenté de résoudre. Par ailleurs, par la nature même du projet, l'évaluation a nécessité de modéliser des horizons temporels très longs, qui dépassent largement les durées de vie habituellement considérées pour évaluer les projets d'autres secteurs.

D'ici à plusieurs siècles, les tendances de croissance se poursuivront-elles ? Les normes continueront-elles à évoluer ? Quelles seront les trajectoires des prix ? Devant l'impossibilité de prédire l'état de la société et de ses indicateurs macroéconomiques, deux *scenarii* de sociétés ont été imaginés et modélisés, dans lesquels le projet global Cigéo et ses variantes ont été étudiés. Par ailleurs, quelle valeur donner au très long terme ? Le calcul socioéconomique traditionnel recommande d'actualiser les flux futurs, et en particulier, cette évaluation socioéconomique a justement permis de questionner la valeur du taux d'actualisation socioéconomique de très long terme, au travers de 3 hypothèses (borne haute, taux intermédiaire et borne basse).

Ainsi, l'évaluation socioéconomique du projet global Cigéo revêt un caractère aussi inédit, qu'exploratoire. Les résultats de cette évaluation sont jalonnés d'hypothèses qui sont ouvertes à la discussion. D'ailleurs les résultats sont soumis à des tests de sensibilité de valeur des paramètres.

Le rapport d'évaluation socioéconomique est organisé comme suit : le chapitre 1 présente les grands principes de l'évaluation socioéconomique et énonce en quoi son application au projet global Cigéo nécessite des ajustements et approfondissements méthodologiques imaginés dans ce cadre spécifique. Le chapitre 2 donne des éléments du contexte nucléaire français en général et relatif à la gestion des déchets radioactifs en particulier. Il propose également une comparaison avec les choix réalisés à l'étranger, dans 13 autres pays.

Le chapitre 3 présente les *scenarii* macroéconomiques possibles dans lesquels le centre de stockage Cigéo pourrait voir le jour et être exploité. Il permet également de poser les jalons théoriques qui sous-tendent les différentes simulations relatives au taux d'actualisation et expose la manière dont sont effectuées les décisions optimales du point de vue mathématique dans un contexte où les choix et aléas sont multiples.

Puis, le chapitre 4 est dédié à la présentation des options qui sont comparées entre elles. Dans le chapitre 5, les coûts de ces différentes options sont détaillés : la formation des coûts bruts, mais également les coûts dans les différents *scenarii* et en tenant compte de l'actualisation. À chaque étape des calculs de sensibilité sont effectués. Le chapitre 6 quant à lui, propose, face aux coûts des différentes options, de s'interroger sur la façon dont les options permettraient de se protéger des conséquences d'un accident nucléaire relatif aux déchets radioactifs dans une société chaotique. Les conséquences d'un accident sont donc estimées et différentes probabilités d'accident sont étudiées.

Enfin en conclusion, le chapitre 7 fait la synthèse en mettant en évidence les comparaisons des couples « coûts-bénéfices » des différentes options étudiées, dans chaque scénario de société.

» **NOTA BENE**

Débutée en janvier 2018, les travaux de la présente évaluation socioéconomique se sont poursuivis en 2019 pour être finalisés en 2020. L'année 2019, au cours de laquelle sont apparus les premiers résultats, a donc été choisie comme année de référence pour le calage temporel du modèle (année t0).

1

Présentation de la méthode d'évaluation socioéconomique

1.1	La démarche et le principe	26
1.2	Les particularités de l'analyse coûts-bénéfices	27
1.3	Les indicateurs calculés	28
1.4	Les spécificités et limites de l'analyse coûts-bénéfices du projet global Cigéo	29

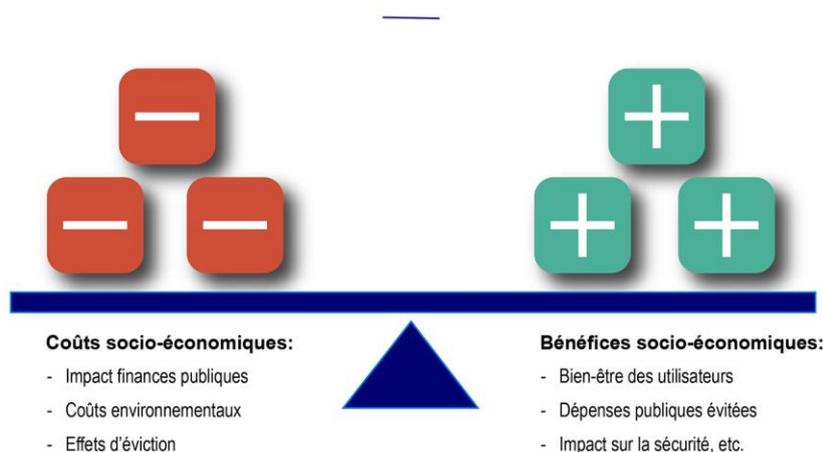


1.1 La démarche et le principe

L'évaluation socioéconomique constitue un outil d'aide à la décision publique permettant de mesurer l'utilité de l'investissement. Grâce à l'analyse coûts-bénéfices, elle permet de déterminer si, compte tenu de son coût, un projet est suffisamment créateur de valeur. Elle consiste à comparer les coûts et les bénéfices de toutes natures, pour l'ensemble des acteurs du projet, et sur le temps long. Les procédures pour effectuer cette comparaison ont été codifiées par des rapports et directives de France Stratégie, dont les plus pertinentes pour la présente évaluation sont le rapport sur l'« Évaluation socioéconomique des investissements publics » de 2013 et le « Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics » de 2017, auxquels le lecteur peut se reporter pour avoir davantage de détails et précisions sur la méthode, et auxquels il sera souvent fait référence dans ce rapport.

L'évaluation socioéconomique se distingue notamment de l'évaluation financière par le périmètre des impacts pris en compte : l'évaluation financière examine uniquement les effets financiers d'une opération (dépenses et recettes), tandis que l'évaluation socioéconomique s'intéresse à un périmètre d'impacts bien plus large, à la fois en nature et en termes d'acteurs touchés. Si les projets d'intérêt général ont un coût, ils sont rarement générateurs de recettes (c'est le cas du projet Cigéo : il n'a aucune visée commerciale et ne génère pas de recettes). Pourtant, les projets d'intérêt général ont des bienfaits que l'analyse socioéconomique prend en compte : ces coûts et bénéfices peuvent être de nature économique, sanitaire, sociale, environnementale, etc. (cf. Figure 1.1-1).

Le principe de l'évaluation socio-économique: la création de valeur d'un projet dépasse-t-elle ses coûts?



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0007-A

Figure 1.1-1 Le principe de l'évaluation socioéconomique

1.2 Les particularités de l'analyse coûts-bénéfices

Deux particularités caractérisent les évaluations socioéconomiques :

1.2.1 Des évaluations en différentiel

Ces évaluations ne peuvent qu'être différentielles. Dans les rapports de France Stratégie, cette différence s'effectue entre une situation **sans le projet**, appelée indifféremment « option de référence » ou « contrefactuel », et une situation avec **mise en place du projet** appelée « option de projet ». Ici, l'approche adoptée propose une analyse en différentiel plus riche puisqu'elle compare l'option de projet centrale avec de nombreuses autres options et des variantes. Ainsi, les résultats de ces études indiquent le delta de création (ou de destruction) de valeur du projet par rapport aux autres options.

Les différentes options se placent dans un cadre commun appelé « **scénario de référence** », lequel rassemble des « hypothèses claires, crédibles et fondées relatives au contexte d'évolution future, exogène au projet » (instruction du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport et sa note technique du 27 juin 2014, Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie). En d'autres termes, le scénario de référence présente le contexte économique, social et environnemental dans lequel s'inscrit le projet. En général, le contexte économique est défini sur la base d'hypothèses d'évolution des variables exogènes (sur lesquelles le porteur de projet n'a pas de maîtrise) et qui peuvent influencer l'intérêt de l'investissement. Dans le cas où des hypothèses très contrastées peuvent être formulées quant à l'évolution du contexte économique (comme c'est le cas pour ce projet qui s'inscrit dans un temps très long), plusieurs *scenarii* peuvent être modélisés.

1.2.2 La monétarisation

Afin de comparer des coûts et bénéfices de différentes natures, ceux-ci doivent être exprimés dans une unité commune. L'unité monétaire est la référence, ce qui implique de procéder à une monétarisation.

La monétarisation des coûts et bénéfices peut s'effectuer de plusieurs façons :

- lorsque l'impact constitue un impact économique direct, il s'exprime directement en unité monétaire, à l'instar des coûts évités liés à la diminution de la consommation d'énergie par exemple ;
- pour d'autres impacts, des valeurs de référence (dites « valeurs tutélaires ») peuvent être utilisées. Le rapport Quinet et le guide méthodologique (2013 (11)) définissent un certain nombre de valeurs tutélaires, telles que la valeur du temps, ou la valeur de la tonne de CO₂, ou encore la valeur de la vie humaine.
- lorsque de telles valeurs de référence n'existent pas, les impacts qui ont pourtant une traduction en termes de bien-être, sont monétarisés en extrapolant les résultats d'articles académiques. Ces articles peuvent mobiliser une des deux méthodologies suivantes :
 - ✓ la première a pour objet de faire « révéler les préférences » des individus, et *in fine* de leur donner une valeur : ce sont les techniques de préférences déclarées ou révélées, ou celles de prix hédoniques. Par exemple, ces méthodes ont permis de révéler le consentement à payer pour s'assurer contre un accident nucléaire en Suisse (Zweifel, Schneider et Wyss, 2005 (12)) ;
 - ✓ la seconde évalue les coûts ou bénéfices économiques complets et à long terme attribuables aux impacts. C'est par exemple l'exercice auquel s'est livré l'IRSN (13), qui a estimé en 2013 le coût économique des accidents nucléaires, impliquant la fusion du cœur d'un réacteur de production d'électricité en France, et les impacts associés en termes de coûts d'image (tourisme, produits agricoles, industrie), de coûts liés à la production d'énergie, de coûts de gestion des territoires contaminés, de coûts radiologiques hors site (coûts de santé, pertes agricoles), de coûts sur site (décontamination, démantèlement, électricité non produite).

1.3 Les indicateurs calculés

Une fois l'ensemble des coûts et bénéfices traduits dans l'unité monétaire, des indicateurs socioéconomiques sont calculés, et notamment :

La Valeur Actualisée Nette (VAN) socioéconomique : c'est la création de valeur collective créée par le projet (gains socioéconomiques), nette des coûts du projet, sur l'ensemble de la vie du projet, ramenée en une valeur d'aujourd'hui. En d'autres termes, ce sont les bénéfices socioéconomiques, moins les coûts socioéconomiques, exprimés en différentiel.

Une VAN positive (> 0) indique que le projet est préférable à l'option à laquelle cette VAN le compare. Parmi les différentes options de projet, ce critère donne la *priorité* à l'option dont la VAN est la plus élevée.

Là encore, on note deux spécificités du calcul socioéconomique :

- Le **coût socioéconomique** du projet ne doit pas être assimilé au montant investi dans le projet. Plusieurs raisons à cela :
 - ✓ on tient compte des coûts sur l'ensemble de la durée de vie du projet, c'est-à-dire, des coûts d'entretien et de maintenance par exemple ;
 - ✓ les fonds publics étant rares, on multiplie les montants publics dépensés par un coût d'opportunité des fonds publics (COFP), dont la valeur est donnée par le rapport Quinet (2013 (11)) à 1,25 et qui représente le coût supplémentaire par unité d'argent prélevée. S'agissant du projet Cigéo, le principe du pollueur-payeur s'applique. Ainsi, seule une partie du financement provient d'un établissement public producteur de déchets : celle du CEA⁸. À noter que la quote-part de ce financement public a toutefois vocation à être discutée entre l'État et les producteurs dès la fin de la phase actuelle de conception initiale du centre de stockage Cigéo.
- Les euros de périodes différentes ne présentent pas la même utilité. Le taux d'actualisation sert à ramener en valeur d'aujourd'hui des coûts ou des bénéfices qui surviendront demain. En effet, 1 euro demain a une valeur moindre que 1 euro aujourd'hui. Ce taux d'actualisation est composé d'une part, d'un taux sans risque représentant les effets de la croissance économique et de la préférence pure pour le présent ; et, d'autre part, d'une prime de risque, reflétant le caractère pro ou anticyclique du projet. Le rapport de France Stratégie de 2013 demande de calculer les VAN dans deux systèmes d'actualisation, le premier avec un taux fixe, le même pour tous les projets, le second avec un taux différent d'un projet à l'autre et tenant compte de la sensibilité du projet au risque systémique. Notons que le taux d'actualisation, si son jeu dans les calculs est le même que celui du taux d'intérêt financier, n'a pas du tout le même rôle, et n'est pas déterminé selon les mêmes principes. Ces points seront développés dans le chapitre 3 pour la partie théorique, et mis en pratique dans le chapitre 5 du présent document.

La présente évaluation socioéconomique compare les différentes options du point de vue de leurs coûts et coûts évités. L'indicateur final, plutôt qu'une valeur actualisée nette, est appelé coût global actualisé. Ainsi, plutôt que de retenir l'option dont la VAN est la plus élevée, on retiendra l'option qui a le coût global actualisé le plus faible.

⁸ Alors que l'application d'un COFP est la règle générale pour une évaluation socioéconomique, il n'est ici pas pris en compte. En premier lieu, le financement public représentant une part faible du financement total (soit 25 % à appliquer sur la seule part du CEA), son application ne changerait pas les ordres de grandeur en jeu dans cette évaluation. En second lieu, parce que l'application d'un COFP vise à valoriser les distorsions, or le principe du pollueur-payeur est de nature à réduire ces distorsions.

1.4 Les spécificités et limites de l'analyse coûts-bénéfices du projet global Cigéo

Si le principe général de l'évaluation socioéconomique est commun à tous les projets évalués, quel que soit le secteur, l'évaluation socioéconomique de la solution actuellement retenue pour gérer les déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) pose d'importants défis méthodologiques. Une discussion élargie des limites de l'évaluation socioéconomique appliquée au projet de centre de stockage Cigéo sera proposée au chapitre 7. Mais, dès à présent, il importe d'exposer les singularités essentielles, de façon à guider la lecture des analyses produites.

1.4.1 L'incertitude liée à l'estimation des coûts et bénéfiques des solutions étudiées

Actuellement, les déchets HA et MA-VL déjà produits sont entreposés de manière sûre dans des installations de surface, il s'agit là d'un mode de gestion temporaire d'après les conclusions rendues par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2006, pour lequel l'entreposage de longue durée « *ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue* » (cf. Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1^{er} février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL), menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 (14)).

L'ASN souligne notamment le risque et les contraintes liés à la gestion de l'entreposage sur une longue durée et donc, périodiquement, la nécessité de reconditionner des déchets et de reconstruire les installations d'entreposage. L'autorité pointe aussi la « *difficulté d'anticiper et de modéliser le vieillissement de l'installation et des colis de déchets sur de longues périodes dans la démonstration de sûreté* ». Enfin, l'entreposage ne peut pas constituer une solution pérenne, compte tenu du fait que cette solution nécessite un entretien et une surveillance humaine constante. Or, l'ASN relève qu'il n'est pas possible de garantir la pérennité des institutions sur des périodes aussi longues.

C'est dans l'optique de répondre à cette contrainte de pérennité que d'autres solutions ont été envisagées, et ont fait l'objet de nombreuses années de recherches et développement (R&D). Pourtant, dans la mesure où ces solutions n'ont jamais réellement été industrialisées, la quantification de leurs atouts comme de leurs inconvénients respectifs reste difficile à établir.

Bien que l'estimation des coûts ne pose pas de problème conceptuel majeur, nous verrons, en particulier dans le chapitre 5 du présent document, que les estimations de coûts sont, pour certaines, issues d'estimations très détaillées, et pour d'autres qu'elles sont le fruit d'extrapolations de travaux conduits à l'étranger. Compte tenu de l'hétérogénéité des normes de sûreté notamment, des hypothèses ont dû être posées pour transcrire les estimations de coûts au contexte français. L'ensemble de ces hypothèses est décrit de façon transparente tout au long du rapport. Elles n'ont d'autre vocation que celle de modéliser et illustrer les conséquences des choix stratégiques qui se présentent au décideur, et peuvent sans difficulté être soumises à la discussion des experts techniques.

L'estimation des bénéfiques des différentes modalités de gestion des déchets radioactifs est plus délicate encore. Par bénéfice ou qualité, il faut comprendre la capacité des solutions évaluées à confiner et isoler les déchets de manière sûre sur l'ensemble de la durée de vie des déchets. Or, pour les déchets les plus radioactifs, la durée de vie peut dépasser la centaine de milliers d'années. Dès lors, pour inclure le critère bénéfique dans l'évaluation, il convient d'estimer d'une part la probabilité qu'un accident survienne : on se réfère alors aux normes de sûreté de l'Agence internationale de l'énergie atomique, soit 10^{-6} par an. D'autre part, il est nécessaire de calculer ce que coûterait un accident lié à la gestion des déchets radioactifs, pour, en miroir, estimer le bénéfice ou coût évité d'un accident par une technologie qui permettrait de s'en prémunir.

C'est sur ce dernier point que l'évaluation est particulièrement complexe ; il existe en effet très peu de travaux portant sur l'estimation économique des conséquences d'un accident nucléaire (Munro, 2011

(15)). En France, une étude a été menée par l'IRSN (2013 (13)) sur l'estimation du coût économique des accidents nucléaires. Si cette étude est une base précieuse pour la modélisation du coût d'un accident, utilisée dans cette évaluation pour certaines catégories de coûts (notamment, les coûts des réfugiés), la méthodologie n'est, sur certains aspects, pas adaptée au cas d'un accident lié à la gestion des déchets radioactifs et parfois lacunaire en données sur d'autres aspects (notamment, les coûts de décontamination⁹).

Afin d'estimer les conséquences économiques et environnementales d'un potentiel accident lié à la gestion des déchets radioactifs, la présente évaluation a plutôt mobilisé les données issues de l'accident de Fukushima (2011). L'utilisation de cet accident comporte toutefois d'importantes limites :

- L'accident concerne une centrale en exploitation, et non un accident d'entreposage ou de stockage de déchets ;
- Les effets à long terme, et notamment sanitaires, de l'accident de Fukushima ne sont pas encore connus. Par ailleurs, cet accident s'est produit dans une société en ordre de marche (c'est-à-dire capable de se mobiliser pour circonscrire les conséquences d'un accident), ce qui a notamment permis une évacuation rapide des populations. Or l'hypothèse d'une société en ordre de marche à un horizon de plus de 100 ans est discutée dans cette étude.

Dans ce contexte, la présente évaluation socioéconomique vise à établir un jeu d'hypothèses crédibles, posées en transparence, de façon à contribuer au dialogue, construire des solutions plus partagées et faire des choix éclairés.

1.4.2 L'incertitude liée à la durée de vie du projet

La temporalité du projet de centre de stockage Cigéo, excède les horizons des évaluations socioéconomiques classiques, qui sont au maximum de l'ordre du siècle. Pour ce centre de stockage Cigéo, non seulement la construction et le fonctionnement s'étalent sur plus d'un siècle, mais surtout, un de ses principaux atouts réside dans son non-usage : contrairement à l'entreposage, la solution de stockage en couche géologique profonde ne nécessite plus de surveillance active de la part de l'homme, une fois l'installation refermée.

Cette dimension temporelle particulière a deux conséquences majeures :

1. À ces horizons lointains, il est très difficile d'envisager ce que seront la société et l'économie françaises. La bonne réalisation des différents projets d'investissement et leurs impacts sont donc marqués par une très forte incertitude de long terme.
2. La détermination d'un taux d'actualisation sur plusieurs siècles est un exercice très délicat étant donné la très forte incertitude à cet horizon, en particulier sur la croissance de l'économie (Weitzman, 2001 (16)). Dans le cas présent, l'horizon dépasse même celui usuellement pris en compte dans l'analyse du changement climatique (Stern, 2007 (17) ; Nordhaus, 2008 (18)).

⁹ Ces estimations sont basées sur le retour d'expérience de Three Mile Island qui pourrait s'avérer sous-estimé. « Les informations qui proviendront de Fukushima seront précieuses, notamment par les coûts unitaires d'opérations précises [...] Les chiffres globaux devront donc être utilisés avec prudence. » (Source : Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France. Rapport IRSN PRP-CRI/SESUC/2013-00261)

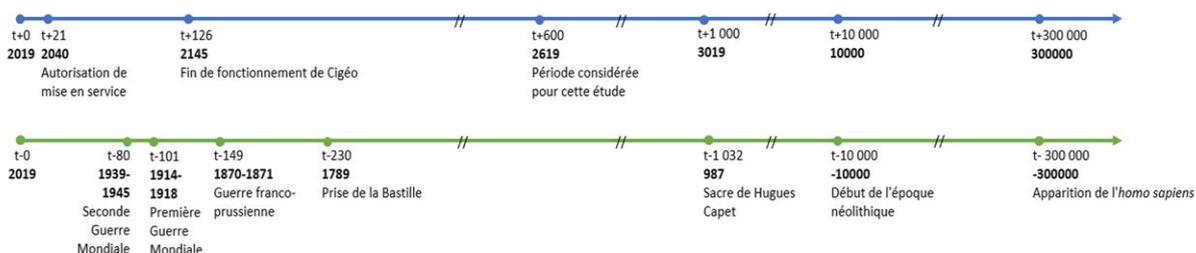
1.4.3 L'incertitude relative à l'état de la société (scénarisation)

En premier lieu, on relève la difficulté à anticiper l'évolution de l'état de la société, s'agissant de la force de ses institutions et de sa gouvernance.

La fermeture du centre de stockage Cigéo est estimée à un horizon de 126 ans, à compter de 2019. Cette durée correspond, à rebours, au tournant du XXe siècle, à une époque située entre la première guerre mondiale et la guerre franco-prussienne.

La période considérée pour l'évaluation socioéconomique de ce projet est plus longue encore (600 ans¹⁰) correspondant, à rebours, à une date proche de l'arrivée de Christophe Colomb en Amérique et la découverte de ce continent.

Enfin, la disparition de la radioactivité des radionucléides aux vies les plus longues, correspond, à nouveau à rebours et en ordre de grandeur, à l'apparition de l'homo-sapiens.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0008-B

Figure 1.4-1 Contextualisation des échelles de temps de l'évaluation socioéconomique

Remis dans cette perspective temporelle, on comprend dès lors que l'état futur de la société est difficile à anticiper même à l'ordre d'un ou deux siècles. Or, de l'état de la société découlera l'importance accordée à la sûreté, à l'environnement et au progrès technologique et, le cas échéant, à affronter les conséquences d'accidents dans la gestion des déchets. S'il est légitime de penser qu'une société en déshérence accordera moins de poids à l'environnement, alors les normes de sûreté et donc la probabilité d'un accident nucléaire diffèrera largement entre une société en ordre de marche et une société chaotique.

En second lieu, et intimement liée à l'état de la société, on soulignera l'évolution de la croissance économique. Si les projections de croissance économique à très court terme se révèlent relativement robustes, les projections à moyen terme sont beaucoup plus incertaines (19). Une estimation précise de l'état de l'économie française, ne serait-ce qu'à l'horizon de la fermeture de Cigéo (dans 125 ans environ), paraît ainsi peu réaliste.

Or, un système de prix relatifs, basé sur l'évolution du PIB/tête, permet de tenir compte des évolutions des préférences dans le temps. Prenons par exemple un bien dont la valeur en 2019 est estimée à 1 million d'euros, valeur supposée augmenter au même rythme que le PIB/tête. Si nous considérons une augmentation constante de 1,5 % du PIB/tête par an, la valeur de ce bien atteint 2,1 millions d'euros en 2070. Si cette croissance n'est que de 1 %, la valeur du bien ne serait « que » de 1,7 millions d'euros en 2070.

¹⁰ La durée d'étude centrale est de 600 ans. Bien que largement inférieure à la durée pendant laquelle le centre de stockage Cigéo peut livrer ses atouts comparativement à d'autres options, il s'agit du siècle au-delà duquel les variations de résultats deviennent non significatives. Pour mémoire, la durée de la conservation de la mémoire du stockage est fixée à 500 ans dans le guide de sûreté de l'ASN.

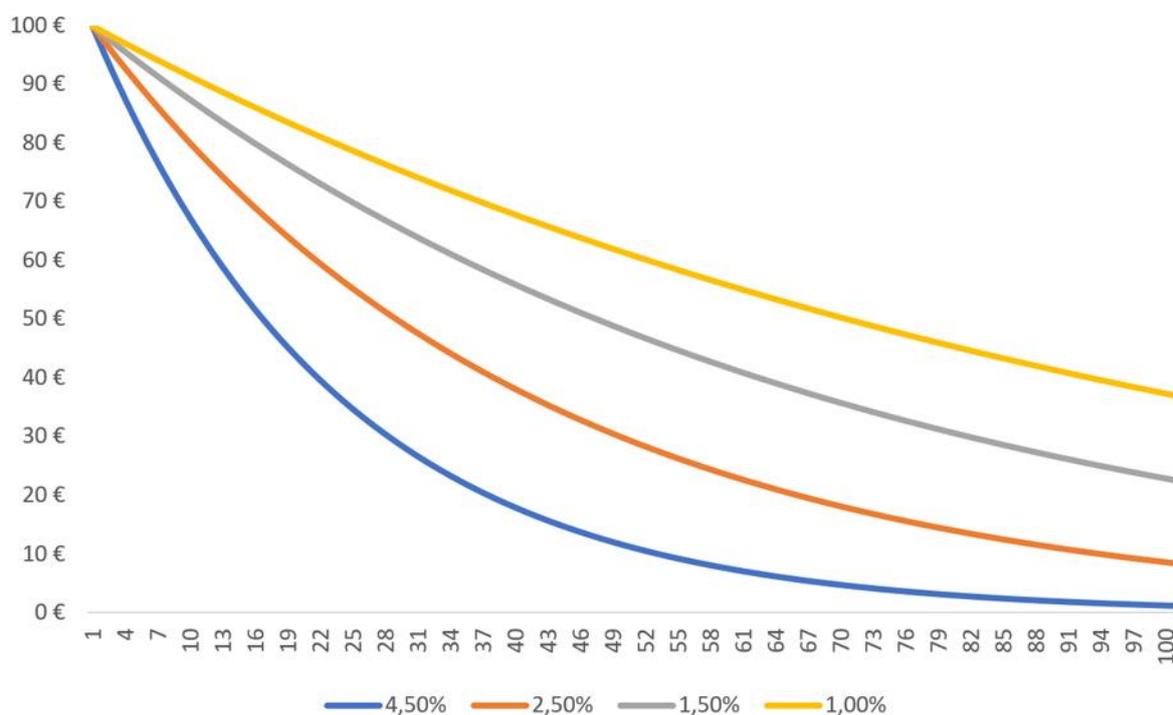
Pour tenir compte de ces incertitudes, la présente évaluation socioéconomique n'inscrit pas les options de projet étudiées dans un seul scénario de référence, mais propose de modéliser deux *scenarii*, c'est-à-dire deux états de monde stylisés et « extrêmes » :

- le scénario « OK » correspond à une société prospère, en paix, bénéficiant d'institutions fortes et d'un État de droit (à l'image de ce qui est observé sous la V^{ème} République et dans le cadre de l'Union européenne (UE). La croissance économique y est positive ; c'est, au moins pour les premières décennies, le scénario utilisé habituellement dans les évaluations socioéconomiques ;
- le scénario « KO » décrit une crise institutionnelle et sociale durable et profonde, présentant un risque important de guerre sur le territoire national. La croissance économique y est moindre. Dans ce contexte, les normes sont moins rigoureuses et la probabilité de survenue d'un accident plus élevée. Il ne s'agit pas de pronostiquer le chaos, mais d'envisager que les situations de crises et de conflits traversées au cours des siècles derniers puissent à nouveau advenir (ce qui, *a contrario*, ne peut être raisonnablement exclu).

1.4.4 L'incertitude relative à la valorisation à long terme (taux d'actualisation et prime de risque)

L'estimation du taux d'actualisation n'échappe pas aux difficultés déjà mentionnées, compte tenu de l'horizon très lointain considéré, or elle a une influence majeure sur les résultats de l'évaluation socioéconomique (pour cette même raison).

Le graphique ci-dessous est l'illustration de l'évolution de la valeur actualisée à des taux différents d'une somme de 100 € dépensée dans le futur. On observe que les valeurs actualisées évoluent de façon sensiblement différente (cf. Figure 1.4-2).



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0009-B

Figure 1.4-2 Simulation de valeurs actualisées, en fonction du choix de taux d'actualisation

Une valeur de 100 € positionnée dans 50 ans, vaut :

- 11 €, ramenée en valeur d'aujourd'hui, lorsqu'un taux de 4,5 % est utilisé (recommandé par le rapport Quinet) ;
- 29 €, ramenée en valeur d'aujourd'hui, lorsqu'un taux de 2,5 % est utilisé ;
- 47 €, ramenée en valeur d'aujourd'hui, lorsqu'un taux de 1,5 % est utilisé ;
- 61 € ramenée en valeur d'aujourd'hui, lorsqu'un taux de 1,0 % est utilisé.

Cet exemple montre à quel point le taux d'actualisation permet d'accorder plus ou moins de poids au futur : plus la valeur du taux d'actualisation est forte, plus le poids accordé au futur est faible et plus la valeur du taux d'actualisation est faible, plus le poids accordé au futur est important.

L'incertitude attachée à la détermination du taux d'actualisation est d'autant plus élevée qu'elle suppose l'estimation de paramètres également frappés d'incertitudes, *a fortiori* sur les échelles de temps considérées, ce qui justifie d'explorer, à côté des valeurs recommandées par les instructions officielles, d'autres valeurs, en particulier pour les prolonger dans le temps, car elles se limitent à un horizon bien inférieur à celui qui est en cause dans la présente évaluation socioéconomique. Comme nous le verrons dans le chapitre 3 et dans l'annexe dédiée à la discussion sur le taux d'actualisation (cf. annexe 1), celui-ci est composé d'une partie dite « taux sans risque », qui est indépendant du projet et qui reflète la préférence pour le présent, les anticipations de croissance (effet richesse) et les arbitrages entre épargne et consommation (effet de précaution). Plus le futur est incertain, plus le taux sans risque décroît dans le temps. L'autre partie du taux d'actualisation est appelé « prime de risque », qui traduit la corrélation ou non corrélation des flux socioéconomiques du projet au PIB.

Pour l'ensemble de ces raisons, l'évaluation socioéconomique du projet Cigéo revêt un caractère aussi inédit qu'exploratoire. Les résultats de cette évaluation sont jalonnés d'hypothèses, ouvertes à la discussion. D'ailleurs les résultats sont soumis à des tests de sensibilité de valeur des paramètres. Malgré les incertitudes, le parti a toujours été pris, au cours de cette évaluation, de proposer une modélisation qui éclaire le choix du public, plutôt que de renoncer à évaluer, au motif des complexités. Au gré des progrès des connaissances, le modèle qui sous-tend ce rapport, pourra être complété et discuté.

2

Contexte et stratégie nationale

2.1	L'origine de la production de déchets radioactifs	36
2.2	La gestion des déchets radioactifs : le contexte français	38
2.3	Le cas des déchets HA et MA-VL	41
2.4	Le choix du projet Cigéo, description et cheminement	44
2.5	La gestion des déchets HA et MA-VL à l'international : panorama	49



Ce chapitre vise à proposer, dans des termes non techniques, une description du paysage de la production d'énergie d'origine nucléaire en France et à l'international. Il revient en détails sur le cas français, l'origine des déchets, leur classification et l'historique du projet Cigéo. Il a également vocation à présenter la situation relative à la gestion des déchets radioactifs dans 13 pays étrangers. Ce panorama montre que la France est en pointe sur le sujet et il servira de base à la justification de certaines hypothèses dans les chapitres suivants.

2.1 L'origine de la production de déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. La gestion des déchets radioactifs comprend toutes les activités liées à la manipulation, au prétraitement, au traitement, au conditionnement, à l'entreposage et au stockage des déchets radioactifs. En France, cinq secteurs économiques conduisent à la production, la détention ou la gestion de matières et de déchets radioactifs :

- le secteur électronucléaire (centrales nucléaires de production d'électricité, usines dédiées à la fabrication du combustible nucléaire et au traitement du combustible nucléaire usé, etc.) ;
- le secteur de la recherche (activités de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives en particulier) ;
- le secteur de la défense (force de dissuasion et recherche associée, propulsion, etc.) ;
- le secteur de l'industrie non électronucléaire (extraction de terres rares, fabrication de sources scellées, stérilisation et conservation de produits alimentaires, etc.) ;
- le secteur médical (activités diagnostiques et thérapeutiques : scintigraphies, radiothérapies, etc.).

Les secteurs qui contribuent le plus à la production de déchets radioactifs sont les secteurs de l'électronucléaire, de la recherche et de la défense.

En France, la classification des déchets radioactifs repose principalement sur deux paramètres qui permettent de définir le mode de gestion approprié : le niveau de radioactivité et la période radioactive des radionucléides présents dans le déchet. Concernant le niveau de radioactivité des déchets, on distingue les déchets de :

- très faible activité (TFA) avec une activité inférieure à 100 becquerels par gramme ;
- faible activité (FA) avec une activité comprise entre quelques centaines de becquerels par gramme et un million de becquerels par gramme ;
- moyenne activité (MA) avec une activité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme ;
- haute activité (HA) avec une activité de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme.

Concernant la période radioactive, on distingue :

- les déchets dits à vie très courte (VTC), qui contiennent des radionucléides dont la période est inférieure à 100 jours ;
- les déchets dits à vie courte (VC) dont la radioactivité provient principalement de radionucléides qui ont une période inférieure ou égale à 31 ans ;
- les déchets dits à vie longue (VL) qui contiennent une quantité importante de radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans.

Selon l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (9), édité par l'Andra en 2020, le bilan des volumes des différentes catégories de déchets radioactifs déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2018 sont précisés dans le Tableau 2.1-1 ci-dessous :

Tableau 2.1-1 Bilan des volumes de déchets déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2018 (Andra, 2020 (9))

Catégorie de déchets radioactifs	Stock total à fin 2018 en volume (m ³)	Sur sites producteurs-détenteurs	Stockés dans les centres de l'Andra	Capacité des stockages existants
HA	3 880	3 880	0*	0*
MA-VL	43 000	43 000	0*	0*
FA-VL	93 700	93 700	0*	0*
FMA-VC	945 000	82 000	862 000	1 530 000
TFA	557 000	181 000	376 000	650 000
Déchets sans filière (DSF)	1 350	1 350	-	-

Les déchets FMA-VC et TFA sont entreposés sur leur site de production pour reprise, conditionnement ou évacuation vers les centres de stockage de l'Andra.

* Ces déchets ne sont actuellement pas stockés : le stockage des déchets HA et MA-VL est actuellement en projet (Cigéo). Le stockage des déchets FA-VL est également à l'étude. Les déchets sans filière (DSF) sont destinés à intégrer une filière de gestion après éventuellement traitement ou caractérisation.

Cette évaluation socioéconomique concernant exclusivement les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, seules ces deux catégories sont précisées ci-après :

- Les déchets de haute activité rassemblent, dans un volume réduit, la plus grande partie de la radioactivité des déchets. Ils proviennent essentiellement de l'industrie électronucléaire et des activités de recherche associées et, dans une moindre mesure, des activités liées à la défense nationale. Ils sont principalement constitués par les substances non valorisables, à savoir des résidus hautement radioactifs provenant de la dissolution chimique des combustibles usés générés par le retraitement de ce combustible après son utilisation dans un réacteur nucléaire. La plupart de ces déchets sont incorporés dans du verre puis conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable. Ces déchets dégagent de la chaleur.
- Les déchets de moyenne activité à vie longue sont principalement issus du retraitement des combustibles usés et des activités de maintenance et de fonctionnement des usines de retraitement. Il s'agit notamment des déchets de structure des assemblages de combustibles (embouts et coques), de déchets technologiques (outils usagés, équipements, etc.) et de déchets issus du traitement des effluents comme certaines boues. Ils se caractérisent par une présence significative de radionucléides à vie longue.

2.2 La gestion des déchets radioactifs : le contexte français

En France, les principes de gestion des déchets radioactifs s'inscrivent dans un cadre réglementaire strict défini aux niveaux national et international. La France est par ailleurs signataire de la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la gestion des déchets radioactifs du 5 septembre 1997 (20) établie sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique, intervenant dans le cadre de l'Organisation des nations unies (ONU).

Au niveau européen, le Conseil de l'Union européenne a adopté la directive n° 2011/70/Euratom le 19 juillet 2011 (21), établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs depuis leur production jusqu'à leur stockage. Cette directive couvre toutes les étapes de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs résultant d'activités civiles. La directive prévoit ainsi que chaque état membre établisse et maintienne un cadre prévoyant l'élaboration de programmes nationaux pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, l'octroi d'autorisations, la réalisation d'inventaires, de mesures de contrôle et d'inspections, de mesures d'exécution telle que la suspension de l'exploitation, la répartition des responsabilités, l'information et la participation du public et le financement de la gestion des déchets radioactifs. Chaque état membre est responsable en dernier ressort de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs produits sur son territoire.

Au niveau national, la France a défini et mis en œuvre une politique publique en matière de gestion des déchets radioactifs dans un cadre législatif établi en 1991 (loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (22)) et complété en 2006 (loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4)) et en 2016 (loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (2)). Ces lois sont aujourd'hui codifiées dans le code de l'environnement. Conduite par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) au sein du ministère de la Transition écologique, cette politique comporte trois piliers :

1. Un Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) mis à jour tous les trois ans par l'État et fixant un programme de recherches et de réalisations (cf. l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement) ;
2. Des dispositions en matière d'évaluation indépendante des recherches, d'information du public et de dialogue avec l'ensemble des parties prenantes ;
3. La garantie de la disponibilité des financements nécessaires : en vertu de l'article L. 110-1 du code de l'environnement, selon lequel « les frais résultants des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ».

► LE FINANCEMENT DU PROJET GLOBAL CIGÉO

Dans une logique de responsabilité, le financement des études, de la construction, du fonctionnement et de la fermeture de Cigéo est assuré dès aujourd'hui par les générations actuelles pour ne pas en reporter la charge sur les générations futures. Cela se traduit par des provisions faites par les trois producteurs de déchets concernés (EDF, le CEA et Orano) et qui sont régulièrement mises à jour.

Actuellement, les coûts de recherche et de conception du projet Cigéo sont ainsi financés par les trois opérateurs de la filière électronucléaire *via* une taxe affectée pour les recherches et le Laboratoire souterrain, et une contribution spéciale pour les études de conception des installations et les travaux préalables :

- **Le fonds recherche**, en place depuis 2007, est alimenté par la taxe dite « de recherche » qui est une taxe additionnelle à la taxe sur les installations nucléaires de base collectée auprès des exploitants de ces installations. Le produit de cette taxe, qui est fixée par loi de finances et par décret, est de l'ordre de 65 millions d'euros par an, plafonné à 55 millions d'euros par an pour 2020 et les années suivantes. Ce fonds finance la recherche et les études nécessaires à la caractérisation du stockage réversible en couche géologique profonde, le fonctionnement du

Laboratoire souterrain, les expérimentations scientifiques, ainsi que les études concernant la mémoire.

- **Le fonds conception**, créé à partir du 1^{er} janvier 2014, est alimenté par une contribution spéciale pour assurer le financement des études de conception industrielle des installations de Cigéo, la communication et l’insertion territoriale du projet, les acquisitions foncières, le management et la gestion de projet, et des travaux d’aménagements préalables de site. Le produit de cette contribution est de l’ordre de 120 à 140 millions d’euros par an.
- **Le fonds construction**, à créer, sera destiné au financement de la construction, de l’exploitation, de la fermeture, de l’entretien et de la surveillance.

Conformément à l’article L. 542-12 du code de l’environnement, l’Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a remis en octobre 2014 à la Ministre chargée de l’Énergie une évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. L’ASN et la Commission nationale d’évaluation (CNE2) ont rendu leur avis sur le dossier d’évaluation de l’Andra. Les principaux producteurs de déchets radioactifs (EDF, le CEA et Areva¹¹) ont également émis des observations sur ce dossier. Le ministère a fixé par arrêté le coût à 25 milliards d’euros aux conditions économiques du 31 décembre 2011 sur la période 2016-2156. Ce coût sera mis à jour aux étapes clés du projet.

Le PNGMDR s’appuie sur les données de l’Inventaire national des matières et déchets radioactifs de l’Andra pour dresser le bilan des modes de gestion existants, recenser les besoins prévisibles d’installations d’entreposage ou de stockage et déterminer les objectifs à atteindre pour les déchets radioactifs qui ne font pas encore l’objet d’un mode de gestion définitif. Il s’appuie également sur les travaux d’un groupe de travail pluraliste, co-présidé par l’ASN et la DGEC et constitué de représentants de l’administration, des autorités de sûreté, des gestionnaires de déchets radioactifs, des producteurs de déchets et de représentants d’associations de protection de l’environnement. Les modalités de gestion (exutoires) pour les différentes catégories de déchets radioactifs sont précisées dans le tableau 2.1-1 ci-après.

Tableau 2.2-1 Modalités de gestion des différentes catégories de déchets radioactifs

CATÉGORIE	Déchets dits à vie très courte contenant des radionucléides de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période ≤ 31 ans	Déchets dits à vie longue dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période > 31 ans
Très faible activité (TFA)		 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d’entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA)	Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (centres de stockage de l’Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l’étude dans le cadre de l’article 4 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Moyenne activité (MA)			 Stockage profond à l’étude dans le cadre de l’article 3 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Haute activité (HA)	Non applicable		

CG-TE-D-MGE-AMOA-CM0-0000-18-0009-A

Conformément à l’article L. 542-1 du code de l’environnement (1), les producteurs de déchets radioactifs sont responsables de la gestion de leurs déchets avant leur évacuation vers un exutoire définitif. En particulier, ils doivent trier et définir les modes de traitement et de conditionnement des déchets, en fonction des technologies disponibles, dans l’objectif de réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs. Ils assurent l’entreposage des déchets qui n’ont pas d’exutoire définitif à ce jour.

¹¹ Orano à compter de janvier 2018.

L'Andra est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs français. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). L'article L. 542-12 du code de l'environnement (23) précise les missions de l'Andra qui doit, entre autres, concevoir et mettre en œuvre une solution de gestion à long terme pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) qui sont actuellement entreposés.

Concernant l'évaluation des choix scientifiques et technologiques, le Parlement s'appuie sur les travaux de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) créé en 1983. L'OPECST a joué un rôle majeur en amont de la loi de 1991 (Barthe, 2006 (24)). Le Parlement s'appuie également sur la Commission nationale d'évaluation (CNE) qui est chargée d'évaluer annuellement l'état d'avancement et la qualité des recherches sur la gestion des matières et des déchets radioactifs (cf. article L. 542-3 du code de l'environnement). La Commission nationale d'évaluation publie annuellement un rapport qui est transmis au Parlement et est rendu public et disponible sur www.cne2.fr.

► LES ACTEURS INSTITUTIONNELS DE LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS EN FRANCE

• L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)

Créée par la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (25), « l'ASN assure, au nom de l'État, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France pour protéger les travailleurs, les patients, le public et l'environnement des risques liés à l'utilisation du nucléaire » (26). Cette autorité est indépendante. Ses missions s'articulent autour de la réglementation, le contrôle et l'information du public. Dans le cadre du projet Cigéo, l'ASN vérifiera si ce projet se conforme aux grandes orientations décrites dans le « Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde », qu'elle a publié en 2008 (27). Elle instruira le cas échéant la demande d'autorisation de création, et si elle est obtenue, la demande d'autorisation de mise en service permettant son fonctionnement. L'ASN contrôlera alors le centre de stockage en couche géologique profonde pendant son fonctionnement comme après sa fermeture. L'ASN a déjà rendu un avis sur les options de sûreté de Cigéo en 2018, soulignant notamment sa maturité technique satisfaisante au stade du dossier d'options de sûreté (28).

• L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Créé en 2001, l'IRSN exerce des missions d'expertise et de recherche dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la sûreté des transports de matières radioactives et fissiles, de la protection de l'homme et de l'environnement contre les rayonnements ionisants, de la protection et du contrôle des matières nucléaires et de la protection des installations nucléaires et des transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance. L'institut est également chargé d'une mission d'appui technique aux autorités publiques compétentes en sûreté, notamment l'ASN. Dans le cadre du projet Cigéo, l'IRSN a également rendu son avis sur le dossier d'options de sûreté rédigé par l'Andra.

• Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN)

Créé par la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (25), le HCTISN est une instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire. À ce titre, le Haut Comité peut émettre un avis sur toute question dans ces domaines ainsi que sur les contrôles et l'information qui s'y rapportent. Il peut également se saisir de toute question relative à l'accessibilité de l'information en matière de sécurité nucléaire et proposer toute mesure de nature à garantir ou à améliorer la transparence. Il travaille notamment sur le projet Cigéo.

• La Commission nationale d'évaluation (CNE)

La Commission nationale d'évaluation a été créée pour évaluer annuellement l'état d'avancement des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs. L'actuelle commission, la CNE2 (29), créée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4), succède à la première commission, la CNE1, créée par la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (22). Pour effectuer son

travail d'évaluation, la commission procède à l'audition des organismes qui effectuent des études et recherches en matière de gestion des matières et des déchets radioactifs. La commission est indépendante ; elle publie annuellement un rapport qui est transmis au Parlement et est rendu public.

- **L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)**

Sur les questions scientifiques de manière générale, et notamment celles relatives aux programmes nucléaires, le Parlement s'est doté d'un organisme d'évaluation propre : l'OPECST. Cet organisme auditionne les acteurs de la gestion des matières et des déchets radioactifs et publie des rapports d'évaluation et des recommandations.

- **La Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)**

Plusieurs ministères interviennent dans la définition, la mise en place et le contrôle de la politique de gestion des matières et des déchets radioactifs. Au sein du ministère de la Transition écologique, la DGEC élabore la politique et met en œuvre les décisions du gouvernement relatives au secteur nucléaire civil.

Des institutions internationales participent également aux débats et à l'évaluation du projet de stockage Cigéo, notamment l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette dernière a notamment rendu un avis en 2016 (30) sur le dossier d'options de sûreté de Cigéo, à la demande de l'ASN.

2.3 Le cas des déchets HA et MA-VL

La gestion des déchets HA et MA-VL vise en premier lieu à protéger l'homme et l'environnement sur le long terme. Cette gestion repose sur plusieurs principes : la sûreté, la pérennité et une surveillance passive, limitant les charges qui seront supportées par les générations futures. Cette préoccupation repose sur l'idée que les générations actuelles, qui ont tiré et tirent des bénéfices de la production d'électricité d'origine nucléaire, assument la gestion des déchets et ne transmettent pas cette responsabilité aux générations futures.

Dans le cadre de la gestion des déchets radioactifs, plusieurs opérations successives sont réalisées. Elles comprennent notamment une étape de tri, de traitement et de conditionnement, une étape d'entreposage (accueil des colis de déchets radioactifs dans une installation adaptée pendant une durée limitée) et une dernière étape de gestion à long terme. Dans le cas des déchets HA et MA-VL, la dernière étape n'est pas encore effective ; elle en est au stade de projet et fait l'objet de la présente évaluation socioéconomique.

Actuellement, ces déchets sont entreposés en toute sûreté sur différents sites en France en attente de la mise en place d'une solution définitive pour leur gestion à long terme. Ces installations d'entreposage sont soumises aux règles de sûreté de l'ASN comme toute installation nucléaire. L'entreposage, tel qu'il est conçu aujourd'hui, a donc principalement pour objectif de protéger l'homme et l'environnement de la dangerosité des déchets radioactifs à titre temporaire sur le court terme en attendant la mise en place d'une solution de gestion pérenne et de long terme. Par ailleurs, pour les déchets HA, l'entreposage permet également de gérer les dégagements de chaleur avant la mise en place d'une gestion de long terme.

La question de la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL fait l'objet de discussions depuis plusieurs décennies en France. Avant toute chose, il convient de rappeler qu'étant donnée la durée de vie de ces déchets, le long terme fait ici référence à une échelle de temps de plusieurs centaines de milliers d'années. Cette problématique fut l'objet de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dite loi « Bataille » (22), cette loi organisa les recherches sur la gestion à long terme des déchets de haute activité et à vie longue. Trois axes de recherche furent définis :

1. La séparation/transmutation des éléments radioactifs à vie longue (axe 1) ;
2. Le stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes (axe 2) ;
3. Les procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface (axe 3).

Cette loi prévoyait notamment la réalisation de programmes de recherche sur quinze ans afin de remettre un rapport global d'évaluation en 2006. Ces travaux furent confiés au CEA (pour les axes séparation/transmutation et entreposage de longue durée) et à l'Andra (pour l'axe sur le stockage géologique profond). Environ 2,5 milliards d'euros furent dépensés sur cette période de quinze ans.

À l'issue de cette période de recherche, les résultats des études furent remis à l'État en 2005. Suite à l'examen de ces résultats et sur la base d'un débat public, le Parlement français choisit le stockage géologique profond comme solution de gestion des déchets HA et MA-VL à travers la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (4). Les principaux points mis alors en avant lors de l'examen des résultats de la recherche peuvent être résumés comme suit :

- la séparation/transmutation n'est pas encore mature ; cette technologie vise à optimiser le volume et la dangerosité des déchets radioactifs sans apporter de solution de mise en sécurité définitive, puisqu'elle génère elle-même des déchets radioactifs ;
- l'entreposage de longue durée transfère la mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL aux générations suivantes et ne présente pas de garantie de sûreté au regard notamment des évolutions sociétales sur le long terme ;
- le stockage dans les formations géologiques profondes est la seule solution disponible de mise en sécurité définitive permettant de confiner la radioactivité et de protéger l'homme et l'environnement sur le très long terme, sans besoin d'intervention humaine.

Bien que ce soit le mode de gestion actuel, l'entreposage de longue durée a donc été écarté par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) pour le long terme, en raison de la nécessité de l'intervention humaine pour assurer une surveillance, reconstruire et entretenir périodiquement les installations tant que les déchets resteront dangereux. Sur des horizons de temps longs (plusieurs siècles, milliers, voire dizaines de milliers d'années), la pérennité de ces actions, du maintien d'un contrôle institutionnel ou du maintien des compétences, ne sauraient être garantis, pouvant alors potentiellement conduire à des risques d'abandon de l'entreposage et à des situations dangereuses. Étant donné l'incertitude sur l'état de la société sur un horizon aussi long, la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) a préconisé le recours au stockage réversible en couche géologique profonde comme solution définitive de gestion des déchets HA et MA-VL.

» LA RÉVERSIBILITÉ : UN PRINCIPE ASSOCIÉ AU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

Cité par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4)(4), la réversibilité est issue du code de l'environnement exigeant que le stockage géologique soit réalisé « *dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité* » (article L. 542-1-1).

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion.* » La réversibilité est mise en œuvre « *par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique* ». La réversibilité inclut « *la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée, cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage* ».

En termes de gouvernance, le code de l'environnement fixe des objectifs pour « *garantir la participation des citoyens tout au long de la vie* » du centre de stockage Cigéo (article L. 542-10-1 du code de l'environnement).

En conséquence, le plan directeur pour l'exploitation du centre de stockage (PDE) sera mis à jour tous les 5 ans, « *en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public* ». Des « *revues de la mise en œuvre du principe de réversibilité* » seront organisées en cohérence avec les réexamens périodiques de sûreté (article L. 542-10-1 du code de l'environnement).

2.4 Le choix du projet Cigéo, description et cheminement

La France a, comme explicité précédemment, choisi le stockage réversible en formation géologique profonde comme solution de long terme pour protéger l'homme et l'environnement des dangers que présentent les déchets HA et MA-VL durant toute leur durée de vie. Le choix s'est porté sur un stockage dans une couche d'argile d'au moins 120 mètres d'épaisseur, à environ 500 mètres de profondeur, âgée de 155 millions d'années, situé à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne. Durant plus de 100 ans, les déchets HA et MA-VL seront acheminés vers des alvéoles de stockage souterraines, avant le scellement définitif du stockage. Par ailleurs, durant toute la phase de fonctionnement (i.e. avant la fermeture définitive), le projet sera réversible : cela permettra de laisser aux générations qui exploiteront le stockage des choix ouverts sur la poursuite ou non de celui-ci. Ces choix seront soumis à la concertation avec les parties prenantes et avec le public tout au long de la vie du projet.

Dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dite loi « Bataille » (22), l'Andra commença dès le début des années 90 les recherches sur le stockage en couche géologique profonde afin d'évaluer la faisabilité de principe du stockage (cf. Figure 2.4-1 ci-après). La première étape fut de sélectionner des sites présentant des caractéristiques géologiques *a priori* favorables et sur la base du volontariat des collectivités locales, pour implanter un laboratoire souterrain de recherche. Sur les sites initialement envisagés, seul celui issu de la fusion des candidatures de la Meuse et de la Haute-Marne fut retenu par le gouvernement. L'autorisation d'installation et de fonctionnement d'un laboratoire souterrain fut actée par décret du 3 août 1999 (31). En septembre 2000, le creusement du puits d'accès principal du laboratoire souterrain débuta. Ce laboratoire souterrain est situé à 490 mètres sous terre, au milieu de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien. Il sert dans le cadre de la recherche fondamentale à approfondir la connaissance et la caractérisation du milieu géologique et dans le cadre d'une recherche technologique et appliquée à étudier en conditions réelles le concept du stockage : comportement de la roche au creusement, à l'échauffement, interactions avec l'eau, essais de creusement (machine à attaque ponctuelle ou tunnelier), etc. En parallèle, de nombreuses études furent menées en surface afin de tester des solutions industrielles qui pourraient être utilisées pour construire, exploiter et fermer le stockage. L'ensemble des recherches aboutit aux conclusions rendues en 2005 au gouvernement, étayant la faisabilité de principe d'un stockage de déchets radioactifs dans la formation du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute-Marne.

À la suite de la décision de 2006 du Parlement, les études au sein du laboratoire souterrain se poursuivirent afin d'affiner le stockage. Le projet, baptisé Cigéo en 2010 (pour Centre industriel de stockage géologique), commença alors à passer dans une phase avec une finalité plus industrielle.

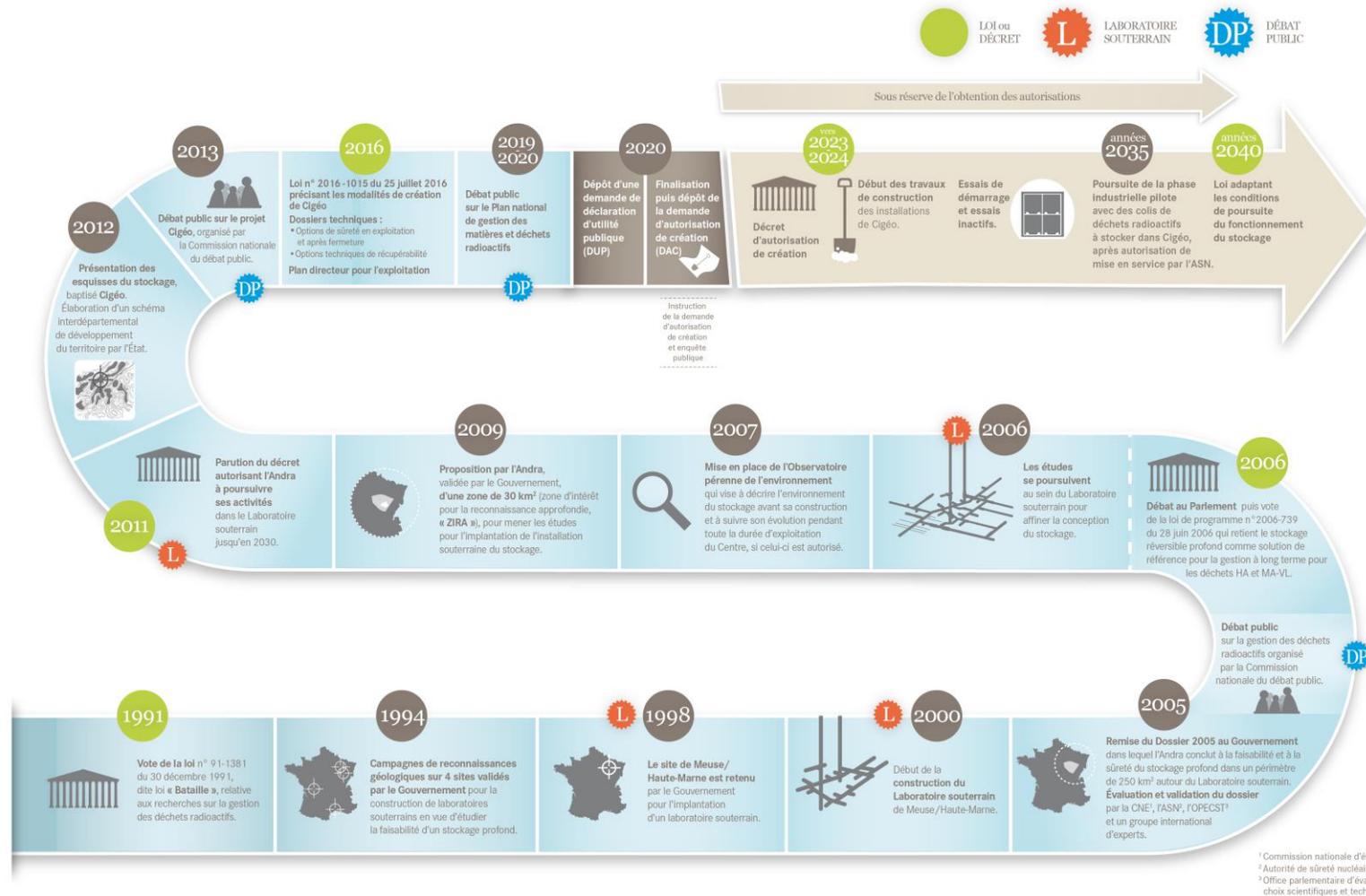
Au début de la **conception**, un débat public fut organisé en 2013¹² sur le projet Cigéo sur la base des études d'esquisse. Pour tenir compte des avis et attentes exprimés durant celui-ci, l'Andra apporta plusieurs évolutions au projet de centre de stockage Cigéo (intégration d'une phase industrielle pilote au démarrage de l'installation, mise en place d'un plan directeur pour le fonctionnement du stockage régulièrement révisé, implication de la société civile dans le projet, etc.).

À partir de 2014, des études d'avant-projet furent lancées. Elles visaient notamment à préciser/optimiser les processus industriels à mettre en œuvre et à définir les options pour assurer la sûreté de l'installation nucléaire, durant le fonctionnement et après la fermeture (cf. dossier d'options de sûreté de Cigéo¹³ de l'Andra (32) (33) (34) (35) remis à l'ASN en 2016 et l'avis de l'ASN rendu en 2018 (28).

La Figure 2.4-1 ci-après illustre l'historique du projet Cigéo à ce jour et le cheminement à venir :

¹² <http://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-cigeo/>

¹³ <https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-3144>



CG-TE-D-MGE-AMOA-CM0-0000-18-0006-E

Figure 2.4-1 Historique du centre de stockage Cigéo et prochaines étapes (source Andra)

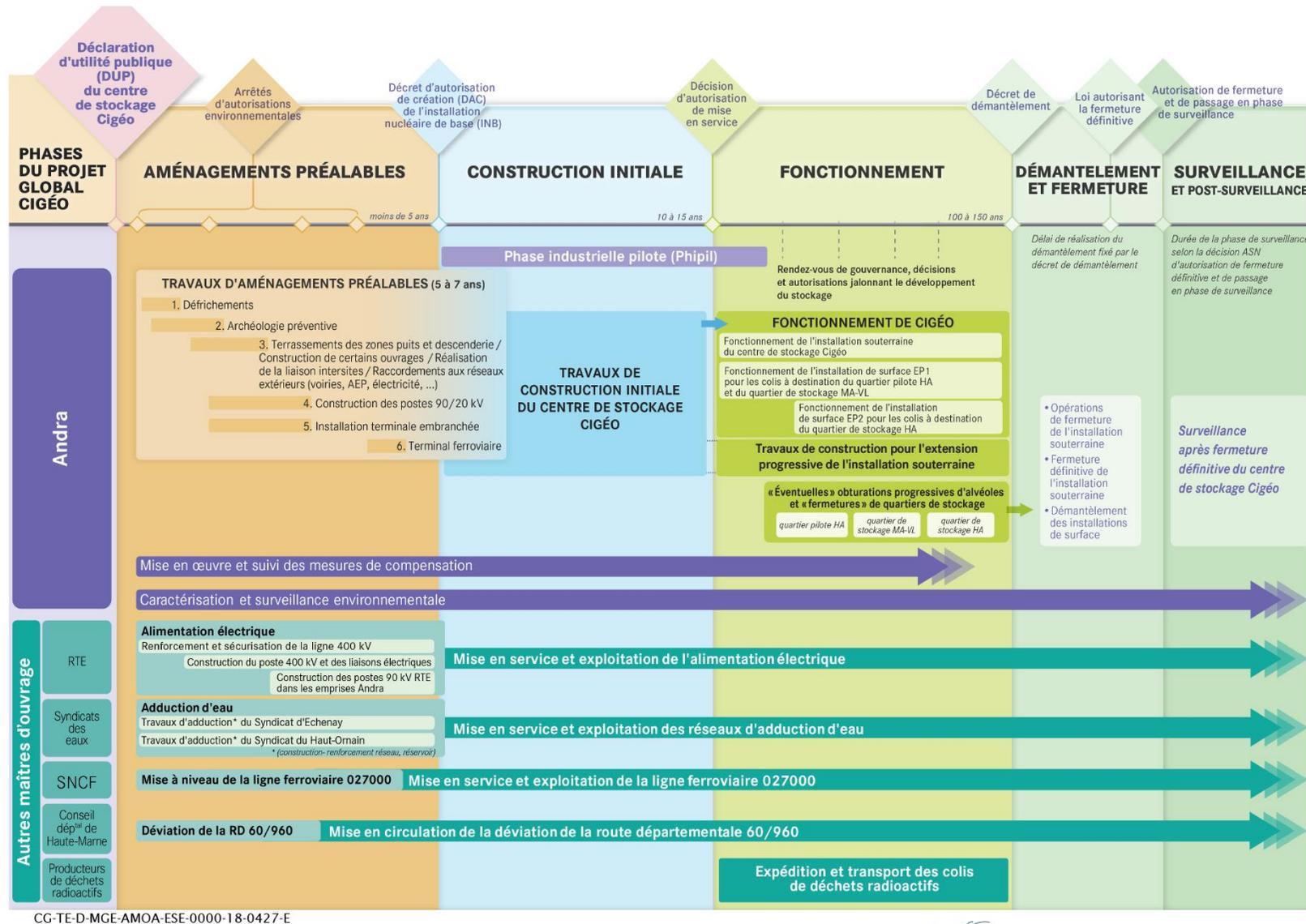


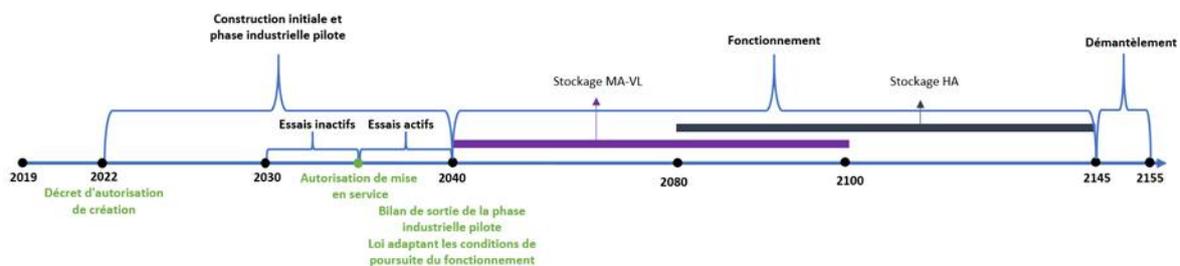
Figure 2.4-2 Les grandes phases du projet global Cigéo

À ce jour, le projet global Cigéo est au stade des premières autorisations réglementaires (cf. Figure 2.4-2 ci-avant). Le dossier de demande de déclaration d'utilité publique (DUP) est le premier dossier support à ces autorisations réglementaires.

Le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) viendra ensuite, sachant que l'obtention de cette dernière conditionne le début de la construction initiale du centre de stockage Cigéo.

Certains travaux, dits **travaux d'aménagements préalables**, interviennent en amont de la phase de construction initiale et se poursuivent quelques années après son démarrage, à l'obtention du décret d'autorisation de création. Ils permettent d'initier la délimitation du site, d'effectuer les premiers terrassements, ainsi que l'amenée des différentes utilités : réseaux d'eau potable, d'électricité, de télécommunications, et le raccordement aux réseaux routiers et ferroviaires.

La Figure 2.4-3 ci-après (à laquelle il sera fait à nouveau référence dans le chapitre 4.3), décrit de manière illustrative le déroulement du centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi à compter de l'obtention du décret d'autorisation de création. Il est précisé que le déroulement et les dates de cette option de projet sont nécessairement schématisés pour les besoins de l'évaluation socioéconomique.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0021-B

Figure 2.4-3 *Calendrier illustratif de l'option de projet 1 : le centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra*

L'obtention du décret d'autorisation de création, conditionne le démarrage des travaux de **construction initiale** du centre de stockage Cigéo. La construction initiale porte principalement sur la construction des bâtiments de surface conventionnels et nucléaires, celles des liaisons surface-fond avec les descenderies et les puits, ainsi que de quelques ouvrages souterrains permettant de recevoir des premiers colis de déchets radioactifs (zones de soutien logistique, galeries d'accès et alvéoles de stockage).

Une **phase industrielle pilote** débute lors de la construction initiale et se poursuit jusqu'à l'obtention de la mise en service et quelques années de fonctionnement. Elle comporte :

- des essais en inactif, qui excluent la manipulation de sources radioactives ou le stockage de déchets radioactifs, consistent à tester les équipements installés, étape nécessaire pour leur mise en service, et à tester des démonstrateurs technologiques en grandeur réelle ;
- des essais en actif interviennent après autorisation de mise en service du centre de stockage Cigéo par l'ASN, conditionnant la réception du premier colis de déchets radioactifs. Au cours des essais en actif, des sources radioactives sont manipulées et les premiers colis de déchets sont utilisés pour vérifier le fonctionnement du procédé en situation réelle, y compris les opérations de retrait de colis des alvéoles. Les essais en actif concernent à la fois des déchets MA-VL et certains déchets HA qui auront suffisamment refroidi (ces déchets sont dits « HAO ») ;
- quelques années de fonctionnement qui permettent d'acquérir du retour d'expérience sur le stockage, la surveillance, la réversibilité, la sûreté, etc.

Pour les besoins de la présente évaluation socioéconomique, il est fait l'hypothèse que le volume des déchets radioactifs traités dans le cadre de la phase industrielle pilote représente environ 5 %¹⁴ du volume total de l'inventaire de référence.

Cette phase industrielle pilote doit permettre à l'Andra de confirmer le bon fonctionnement du projet en conditions réelles et d'acquérir un retour d'expérience robuste du fonctionnement du centre de stockage et de sa surveillance. Un bilan des opérations menées est ensuite transmis à l'ASN, qui fixe en conséquence les conditions de la sortie de la phase industrielle pilote et du passage en phase de fonctionnement, après l'adoption d'une loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité. La réversibilité du stockage est une demande inscrite dans la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) qui comporte la notion d'évaluation régulière des décisions prises antérieurement et la notion de récupérabilité, selon laquelle des dispositifs techniques destinés à faciliter le retrait éventuel de colis de déchets stockés pendant le fonctionnement sont mis en place.

La phase de **fonctionnement**, conditionnée par la loi adaptant les conditions de poursuite du fonctionnement du stockage et répondant aux principes de la réversibilité, se déroule pendant une période d'une centaine d'années au cours de laquelle ont lieu simultanément des opérations nucléaires de réception des colis de déchets radioactifs, de préparation et de mise en stockage souterrain et des travaux conventionnels d'extension de l'installation souterraine, par tranches successives (appelées globalement tranches ultérieures ou TU), afin de construire progressivement l'installation selon un dimensionnement adapté à la chronique de livraison de l'inventaire de référence. Le fonctionnement est jalonné de nombreuses décisions et de rendez-vous de gouvernance, en lien avec le développement progressif du centre de stockage et avec les décisions de politique énergétique nationale (décision d'étendre le quartier MA-VL, décision d'engager le stockage des déchets HA les plus thermiques, décision de faire évoluer l'inventaire, par exemple pour stocker des combustibles usés, décision d'obturation d'alvéoles ou de quartier, etc.).

En surface, des travaux sont également entrepris pour effectuer des jouvences sur les bâtiments existants, adapter les installations par la construction d'annexes ou le remplacement d'anciens bâtiments. Le stockage des déchets MA-VL intervient dans un premier temps, entre 2040 et 2100. Le stockage des déchets HA intervient en décalé, ces déchets nécessitent de refroidir avant d'être stockés dans le centre de stockage Cigéo. Ce stockage intervient ainsi dans un second temps entre 2080 et 2145.

À la fin de la phase de fonctionnement imaginée en 2145, le centre de stockage Cigéo est refermé progressivement durant la phase de **démantèlement** des installations : les différents ouvrages creusés sont remblayés et scellés et les installations en surface sont démantelées¹⁵. Par ailleurs, seule une loi peut autoriser la fermeture définitive du centre.

À partir de ce démantèlement définitif, imaginé en 2155, un processus de **surveillance** passive intervient, le stockage des déchets dans Cigéo ne nécessitant plus d'actions humaines. Il est alors attendu que la couche géologique prenne le relais pour garantir sur des temps très longs le confinement des radionucléides et la protection de l'homme et de l'environnement.

¹⁴ Calcul des auteurs sur la base des données de flux de déchets radioactifs vers le centre de stockage Cigéo (source : Programme industriel de gestion des déchets (PIGD), version E du 9 mai 2016). Le pourcentage exact est de 5,25 % du volume de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue.

¹⁵ Des travaux de fermeture et de démantèlement interviendront avant cette date au fur et à mesure du remplissage des alvéoles. Par exemple, les quartiers MA-VL sont prévus pour être fermés vers 2100 après le stockage des déchets MA-VL. De même, certains bâtiments, ne servant qu'aux déchets MA-VL, pourront être démantelés dès 2100. Les installations communes (puits, descenderies, etc.) ne sont toutefois démantelées et fermées qu'après la fin du stockage des déchets HA.

2.5 La gestion des déchets HA et MA-VL à l'international : panorama

Treize pays ont fait l'objet d'une analyse de leurs pratiques en matière de gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Chacun de ces pays a donné lieu à la rédaction d'une fiche annexée au présent rapport (cf. Annexe 1 à Annexe 13). Ce chapitre constitue une synthèse de ces différentes fiches qui ont nourri la construction des différentes options étudiées plus avant dans la suite de l'évaluation.

Comme en France, de nombreux pays se sont engagés à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle dans l'utilisation de l'atome à des fins militaires et civiles. Ces activités ont conduit à la production de différents types de déchets radioactifs dont le spectre inclut un volume (généralement faible) de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Les réflexions et la recherche afin de disposer d'une solution de gestion des déchets sûre et définitive se sont engagées de manière concomitante à la production des déchets. Ainsi, aux États-Unis d'Amérique, le rapport publié en 1957 par l'Académie des sciences « The Disposal of Radioactive Waste on Land »¹⁶ (36), aborde la question de la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs et présente le stockage en formation géologique profonde (en particulier dans les dômes de sel) comme l'option la plus prometteuse. L'Agence internationale pour l'énergie atomique considère quant à elle que « the deep disposal in stable geological formations as the only sustainable way to safely manage high-level waste » (37).

L'analyse des politiques en matière de gestion des déchets radioactifs et des recommandations des organismes internationaux impliqués dans la gestion des déchets HA et MA-VL indique que l'option de référence retenue pour la mise en sécurité définitive de ces déchets est le stockage en couche géologique profonde. Certaines technologies comme la séparation poussée, la transmutation ou l'entreposage de longue durée sont présentées comme une alternative technique au stockage géologique.

Cependant, l'analyse plus approfondie de la séparation-transmutation montre qu'il s'agit en fait de contribuer à l'optimisation de la gestion de ces déchets¹⁷ plutôt que d'une alternative au stockage géologique comme solution de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL. En France, les avis de l'IRSN ou du CEA, dans le cadre du débat public organisé en 2013 sur Cigéo, appuient ce constat. Ces éléments ne remettent aucunement en cause l'intérêt d'une R&D poussée sur ces technologies qui présentent d'autres attraits. L'IRSN a présenté dans son rapport de 2019, sollicité par la Commission nationale du débat public dans le cadre du débat public relatif au Programme national de gestion des déchets et matières radioactives 2019-2021 (PNGMDR), un état des lieux, au niveau international, des recherches sur les alternatives au stockage géologique ayant été étudiées dans le temps et les raisons de l'abandon de celles-ci. Il mentionne aussi les options qui, sans être des alternatives, sont encore à l'étude (38).

Concernant l'entreposage de longue durée, au Royaume-Uni, le Nuclear decommissioning authority (NDA) indique également que « Ultimately, the implications of long-term interim storage as an alternative management step for UK HAW¹⁸ depend on the extent to which it is implemented and the timescales over which it is applied, but will never remove the need for some form of permanent disposal of HAW, including a Geological Disposal Facility (39) ». Si les Pays-Bas se sont engagés dans une option d'entreposage de long terme (100 ans), cette option est présentée comme temporaire, dans l'attente d'un stockage géologique présenté comme option de mise en sécurité définitive. La Russie, en pointe sur le développement de réacteurs à neutrons rapides (RNR), inscrit dans sa stratégie de gestion des déchets de haute activité la nécessité d'un stockage géologique comme exutoire final pour les déchets HA. Les États-Unis d'Amérique ont réalisé d'importants travaux de recherche et de développement sur la gestion des déchets de haute activité. Si le site de Yucca Mountain (site de stockage géologique de mise

¹⁶ Le Comité à l'origine de cette publication fût créé en 1955 dans l'objectif de développer un programme de recherche sur le stockage de déchets radioactifs en formation géologique.

¹⁷ Les optimisations ont trait à des durées d'entreposage modulées ou à des solutions de réduction de la radio-toxicité des déchets (transmutation).

¹⁸ Le sigle signifie United Kingdom higher activity waste.

en sécurité définitive des déchets radioactifs) a été, du moins temporairement, abandonné, le stockage géologique reste l'option de référence, en particulier pour le Department of Energy (DOE).

En parallèle, depuis le début des années 2000, la solution de forage profond (deep borehole) est présentée comme une alternative potentielle au stockage géologique. L'abandon récent d'une expérimentation de forage profond (deep borehole) aux États-Unis d'Amérique n'est pas liée à un problème de nature technique, mais plutôt à une problématique d'acceptabilité. En Europe, l'Allemagne, le Royaume-Uni ou encore la Belgique ont également manifesté leur intérêt pour cette technologie de forage profond.

De la même façon, le retour d'expérience international sur le stockage en couche géologique profonde met certes en évidence des enjeux techniques (obligation de réversibilité ou de récupérabilité des colis, variété des conditionnements, prise en compte de l'incertitude sur le très long terme, etc.), mais les freins sont *in fine* liés à l'acceptabilité d'une telle installation (même pilote) dans un territoire. Ainsi, la difficulté de trouver un site tient au moins autant à l'enjeu de bénéficier d'un contexte géologique favorable qu'à celui d'obtenir le soutien des acteurs du territoire.

Le temps du processus d'identification d'un site : recensement, caractérisation, laboratoire souterrain, acceptabilité, est long. L'Allemagne estime que 30 années sont nécessaires depuis le lancement du projet jusqu'au démarrage du fonctionnement d'une installation de stockage géologique dans le cas où, idéalement, un site remplit l'entièreté des critères, y compris celui d'un accueil local favorable. En France, près de 30 années se seront écoulées depuis la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dite loi « Bataille » (22) et l'obtention du décret d'autorisation de création de Cigéo envisagé pour 2025. Le processus finlandais, le plus avancé, a débuté en 2000 pour une année de démarrage du fonctionnement envisagée à 2023.

Dans leur argumentaire sur l'intérêt du stockage géologique, les acteurs en charge de la gestion des déchets HA et MA-VL évoquent l'éthique vis-à-vis des générations futures ; l'incapacité à prédire l'état de nos sociétés au-delà de quelques siècles ; l'intérêt de la mise en place d'une solution alors que les producteurs de déchets sont encore présents ; etc. Les différents pays appuient tous le mécanisme de financement/provision pour la gestion à long terme de déchets HA et MA-VL sur le principe du pollueur-payeur et constituent des provisions sur l'hypothèse d'évaluation du coût de l'installation, du retour sur intérêt des provisions et de l'actualisation.

Dans les différents pays investigués, on relève souvent l'existence d'une agence ou d'une commission indépendante ayant la responsabilité de la gestion des déchets radioactifs. Les travaux de recherche et de développement sur le stockage géologique sont coordonnés par ces agences et généralement financés par les producteurs. La définition d'une stratégie de gestion des déchets radioactifs par l'autorité compétente en la matière découle de l'implication d'un large panel d'acteurs institutionnels ou non et des producteurs. Une attention particulière est le plus souvent portée vis-à-vis de l'opinion des acteurs non institutionnels, le processus visant à identifier un site bénéficiant d'un soutien local, régional et national.

Des éléments de synthèse (technologie de référence, avancement du projet et coût) portant sur la stratégie de gestion des déchets HA et MA-VL ont été reportés dans le tableau 2.5-1

Tableau 2.5-1 Panorama international des modalités de gestion des déchets HA et MA-VL parmi 13 pays et la France

Pays	Solution de référence pour la gestion des déchets HA et MA-VL	État d'avancement du projet	Coût estimé du projet	Taille du parc électronucléaire
Allemagne	Stockage géologique pour tous les déchets radioactifs	Processus de sélection d'un site défini dans la loi StadAG de 2013 amendée en 2017. Fonctionnement à l'horizon 2050	Enveloppe de 100 milliards d'euros pour l'inventaire total des déchets radioactifs et la gestion de l'héritage (démantèlement)	17 réacteurs dont 7 en fonctionnement
Belgique	Stockage géologique	Laboratoire souterrain Hades à Mol-Dessel. Définition d'un calendrier indicatif de fonctionnement sur 100 ans	8 milliards d'euros ₂₀₁₈	7 réacteurs en fonctionnement
Canada	Stockage géologique	Investigation poussée sur 5 sites et sélection de 2 sites (2019). Décision du site d'implantation attendue en 2023 pour 40 ans de fonctionnement débutant à l'horizon 2040	15 milliards d'euros (pour 5,2 millions de grappes de combustible usé)	22 réacteurs dont 19 en fonctionnement
Chine	Stockage géologique	3 sites à l'étude pour la construction d'un laboratoire souterrain. Fonctionnement du stockage prévue à l'horizon 2050	Information non disponible	46 réacteurs en fonctionnement et 11 en construction
Espagne	Stockage géologique	Enclenchement du processus de sélection d'un site en 2023 pour un fonctionnement à l'horizon 2069	13 milliards d'euros pour l'ensemble de l'inventaire des déchets radioactifs et le démantèlement des installations	7 réacteurs en fonctionnement et 3 en démantèlement
États-Unis d'Amérique	Stockage géologique	Fonctionnement à l'horizon 2050	De l'ordre de 70 milliards d'euros	98 réacteurs en fonctionnement
Finlande	Stockage géologique	Travaux de construction engagés à Olkiluoto en 2016 pour un fonctionnement prévue en 2023	3,3 milliards d'euros	4 réacteurs en fonctionnement et 1 en construction

Pays	Solution de référence pour la gestion des déchets HA et MA-VL	État d'avancement du projet	Coût estimé du projet	Taille du parc électronucléaire
France	Stockage géologique	Site trouvé avec un laboratoire souterrain exploité et autorisé jusqu'en 2030. Processus d'autorisation initié en 2020 pour une autorisation de création vers 2024	25 milliards d'euros ²⁰¹²	58 réacteurs en fonctionnement, 1 en construction et 9 en démantèlement
Japon	Stockage géologique	2 laboratoires souterrains pour la R&D. Sélection de sites d'ici à 2025 pour un fonctionnement en 2035	24 milliards d'euros	8 réacteurs en fonctionnement, 23 arrêtés définitivement, 21 en attente de redémarrage
Pays-Bas	Stockage géologique	Fonctionnement prévu en 2130	Environ 2 milliards d'euros	1 réacteur en fonctionnement, 1 réacteur mis à l'arrêt définitif
Royaume-Uni	Stockage géologique	Processus de sélection d'un site lancé en 2019.	13,1 milliards d'euros	15 réacteurs en fonctionnement, 2 en construction
Russie	Stockage géologique	Fonctionnement prévu à l'horizon 2030 à Zheleznogorsk	Information non disponible	36 réacteurs en fonctionnement et 6 en construction
Suède	Stockage géologique	Laboratoire souterrain à Aspo (Oskarshamn). Fonctionnement à l'horizon 2030	4,4 milliards d'euros	8 réacteurs en fonctionnement
Suisse	Stockage géologique pour tous les déchets radioactifs	Fonctionnement à l'horizon 2060	17,6 milliards d'euros pour l'ensemble de l'inventaire des déchets radioactifs	5 réacteurs en fonctionnement

Il apparaît que le stockage géologique est la solution de référence retenue par les 13 pays étudiés pour la mise en sécurité définitive des déchets de type HA et/ou MA-VL et/ou combustibles usés. On notera que les coûts estimés de mise en place de cette solution de gestion (lorsqu'ils sont disponibles) varient de 2 milliards d'euros (Pays-Bas) à plus de 70 milliards d'euros (États-Unis d'Amérique et Allemagne). Ces coûts sont toutefois difficilement comparables : le coût dépend en effet de la quantité d'énergie nucléaire produite et du volume de déchets subséquent, de la classification des déchets, très hétérogène entre les pays, et du périmètre de coûts considéré. Il convient par ailleurs de préciser que les projets diffèrent au regard de leur avancement et que certains des chiffres avancés pourraient évoluer sensiblement dans les années à venir.

3

Scenarii de référence et paramétrage du modèle

3.1	Les quantités de déchets radioactifs	54
3.2	Deux possibles états du monde contrastés	56
3.3	Valorisation du temps long et actualisation	68
3.4	Arbres de décision, aléas et critère de choix	84



Le scénario de référence d'une évaluation socioéconomique sert à interroger le contexte économique, social et environnemental dans lequel s'inscrit le projet. Ce contexte est défini sur la base d'hypothèses d'évolution des variables exogènes au projet, mais qui ont une influence sur la pertinence du projet. Par exemple, dans une économie très carbonée, le transport ferroviaire présente généralement un net atout environnemental par rapport au transport routier. Alors que dans une économie dont la décarbonation serait très avancée (avec un développement de transports routiers « propres »), la réalisation de nouvelles infrastructures ferroviaires présenterait un surcoût non nécessairement compensé par des gains environnementaux. Dans un autre registre, la construction d'un stade de grande ampleur n'a d'intérêt que si les projections de fréquentations sont élevées. Dans le cas contraire, il existe un risque de surdimensionnement.

Ces mêmes questionnements sont exposés pour les solutions de gestion des déchets radioactifs. Le projet est-il adapté aux variations sur le volume de déchets à gérer ? Que se passe-t-il si un conflit armé ou un acte terroriste surviennent ? Le projet permet-il alors d'éviter des risques supplémentaires ? Quid si les normes de sûreté, dont la détermination est exogène au projet, s'estompent ? Ou encore si les indices de formation des prix évoluent fortement ?

Le chapitre 3 permet de discuter de ces hypothèses concernant le dimensionnement et le contexte économique, social et environnemental. Parfois très contrastées en raison d'un horizon temporel très étendu, elles mènent à envisager plusieurs *scenarii* de référence.

3.1 Les quantités de déchets radioactifs

Parmi les éléments caractérisant le scénario de référence d'une évaluation socioéconomique, il convient de questionner ceux susceptibles d'influencer le dimensionnement de l'ouvrage et pouvant conduire à un surdimensionnement ou à un sous-dimensionnement.

Comme souligné par la Cour des Comptes (2019), « *des investissements importants – sur le parc actuel de réacteurs ou dans les installations d'entreposage des matières et déchets – doivent être réalisés au cours de la prochaine décennie. Il est nécessaire qu'ils tiennent compte des effets de rétroaction entre l'amont et l'aval du cycle* ». En effet, toute évolution de la politique nucléaire française aura un impact sur l'aval du cycle, et, *in fine* sur le volume de déchets à gérer.

Actuellement, la politique énergétique française prévoit que les combustibles soient en grande partie retraités après leur utilisation en vue de leur valorisation dans les réacteurs à eau pressurisée ou, à long terme, dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR, comme le réacteur de Creys Malville, arrêté en 1997). Le recyclage permet ainsi de réutiliser en partie les matières radioactives et d'en dissocier les déchets ultimes, pour lesquels aucune autre utilisation n'est possible. Dès lors, en cas d'interruption de la production nucléaire ou de non renouvellement du parc, « 400 000 tonnes d'uranium appauvri et 34 000 tonnes d'uranium issu du retraitement des combustibles usés » seraient susceptibles d'être requalifiés en déchets (40).

L'Inventaire national des matières et déchets radioactifs tenu par l'Andra, et remis à jour périodiquement, permet de disposer d'une base solide de connaissances sur l'ensemble des matières et des déchets radioactifs situés sur le territoire national, y compris *de facto*, les déchets HA et MA-VL. L'inventaire de référence pour les déchets HA et MA-VL, qui désigne les déchets radioactifs produits ou à produire destinés au centre de stockage Cigéo, fournit les données d'entrée de cette évaluation socioéconomique. Il porte sur l'ensemble des déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue déjà produits et à produire par les installations nucléaires existantes, ainsi que ceux qui seront produits par les installations nucléaires autorisées (l'outil expérimental ITER conçu pour générer l'énergie de la fusion, le réacteur pressurisé européen EPR de Flamanville, le réacteur de recherches Jules Horowitz de Cadarache), avec l'hypothèse d'une durée de fonctionnement des réacteurs de 50 ans en moyenne.

Les volumes de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence utilisés pour le dimensionnement du centre de stockage Cigéo sont ainsi fixés à **terminaison**¹⁹ aux valeurs de :

- environ 10 000 m³ pour les déchets HA (soit 56 000 colis) ;
- environ 73 000 m³ pour les déchets MA-VL (soit 167 000 colis)²⁰.

L'évolution de la politique énergétique ou de la politique de gestion des matières et des déchets radioactifs peut impacter sensiblement l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs tenu par l'Andra. La prise en compte de ces évolutions potentielles implique un besoin d'adaptabilité qui se traduit dans la définition d'un inventaire de réserve, dont le but est prospectif. En ce sens, il diffère de l'inventaire de référence, qui pour la politique énergétique en vigueur, précise le stock produit et à produire de déchets radioactifs, dimensionnant les installations de stockage nécessaires. Ainsi, l'inventaire de référence donne le dimensionnement du centre de stockage Cigéo, dans le cas des déchets HA et les MA-VL qui lui sont destinés selon la politique énergétique en vigueur. L'inventaire de réserve fixe quant à lui la typologie et les quantités de déchets radioactifs attachées aux différentes hypothèses prospectives envisagées.

L'inventaire de réserve étant en cours de révision au moment de cette étude, les options de gestion à long terme de celui-ci ne peuvent pas faire l'objet d'une évaluation socioéconomique à ce stade. Toutefois, lorsqu'à terme il sera défini, il sera possible d'intégrer les données d'entrées de cet inventaire de réserve à une analyse socioéconomique dédiée.

Il convient de rappeler enfin que ces inventaires de référence et de réserve ne préjugent pas des déchets qui seront *in fine* stockés dans le centre de stockage Cigéo : l'inventaire autorisé au moment de la mise en service sera fixé par le décret d'autorisation de création et donnera lieu à des autorisations successives de prise en charge, toute modification de cet inventaire étant accompagnée d'un nouveau processus d'autorisation.

En effet, l'Andra conçoit le centre de stockage Cigéo de façon à ce qu'il puisse évoluer au fur et à mesure de sa construction par phases successives pour prendre en compte d'éventuelles évolutions en matière d'inventaire des déchets stockés, liées notamment aux stratégies industrielles et énergétiques ou à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets. À ce stade, ces évolutions sont étudiées au travers d'un inventaire de réserve et d'études d'adaptabilité, qui seront présentées dans le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, afin de garantir la capacité du projet à évoluer et à s'adapter à des choix de politique énergétique. C'est un volet important de la réversibilité.

¹⁹ Le terme « à terminaison » signifie à la fin du démantèlement des installations nucléaires autorisées à fin 2016.

²⁰ Les quantités précises fournies dans le Programme industriel de gestion des déchets (PIGD) version E du 9 mai 2016 sont : 10 045 m³ pour 55 896 colis primaires de déchets HA et 73 011 m³ pour 166 699 colis primaires de déchets MA-VL.

3.2 Deux possibles états du monde contrastés

Dans ce chapitre, le contexte économique, social et environnemental sur le temps long est envisagé selon deux possibles états du monde, volontairement contrastés. En effet, compte tenu de la temporalité étudiée, il ne peut pas être assuré que le paradigme d'une croissance continue se poursuive. Ainsi, il convient de s'interroger sur ce qu'un état du monde radicalement différent, de par son instabilité, génèrerait comme conséquences sur la gestion des déchets radioactifs. Les deux états du monde sont appelés scénario « OK » et scénario « KO ». Leur description qualitative est suivie de la description quantitative du paramètre principal de leur modélisation : le taux de croissance.

3.2.1 Le scénario « OK »

3.2.1.1 Description qualitative du scénario OK

Le scénario dit « OK » correspond à un prolongement sur le très long terme des tendances admises dans les prévisions macro-économiques utilisées dans les évaluations socioéconomiques, rappelées dans le guide méthodologique et fondées essentiellement sur les prévisions du Conseil d'orientation des retraites (COR) : autour de variations des taux de croissance économique assurant une croissance en moyenne toujours positive, elles sont fondées implicitement sur une société prospère, en paix, jouissant d'institutions fortes et d'un État de droit.

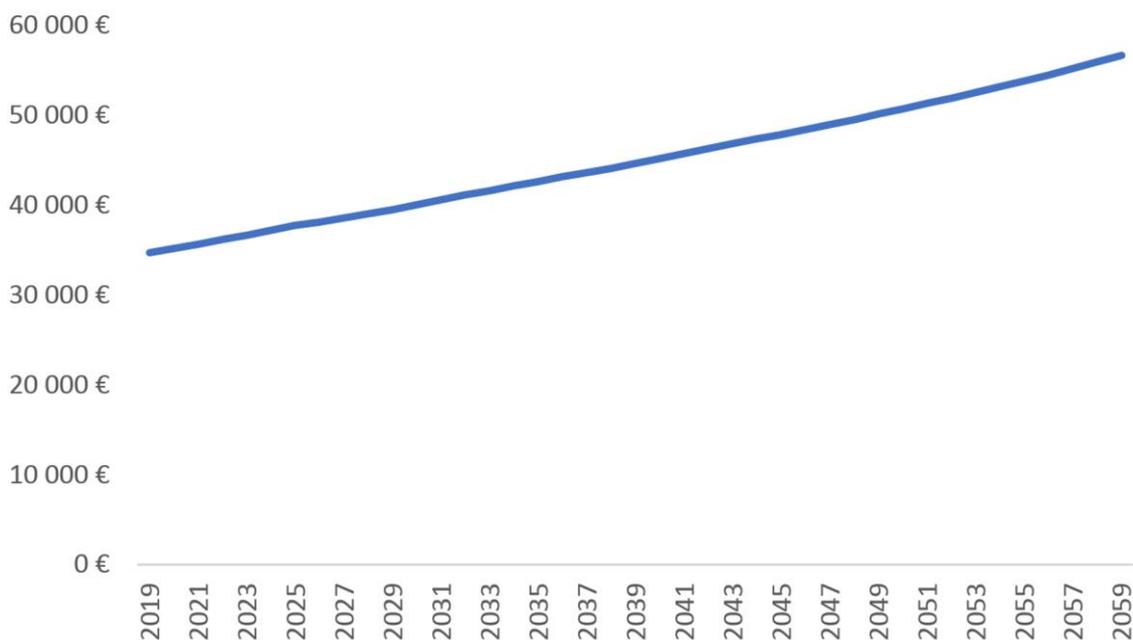
La force des institutions et la prospérité de la société, couplées à un progrès technologique constant, permettent un maintien, voire une augmentation, des normes de sûreté et de sécurité des installations d'entreposage et de stockage des déchets radioactifs. Cet effet est renforcé par une valeur croissante accordée à l'environnement. Par ailleurs, le fort investissement en capital humain et en R&D, semblable aux niveaux actuels, facilite le maintien des compétences, l'augmentation des connaissances et les gains de productivité.

3.2.1.2 Modélisation de croissance du scénario OK

À court et moyen termes (avant 2060), le scénario OK adopte les recommandations officielles de modélisation de scénario de référence fournies par le Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics (2013). Selon ce guide et en ce qui concerne l'évolution du PIB/tête, le complément opérationnel A1 « paramétrage macroéconomique du scénario de référence » recommande de prendre en considération :

- pour la croissance du PIB, le scénario médian-bas du COR, version 2017 ;
- pour la croissance de la population, le scénario central des projections démographiques de l'INSEE.

Les projections de PIB/tête jusqu'en 2060 sont ainsi représentées dans le graphique ci-dessous.



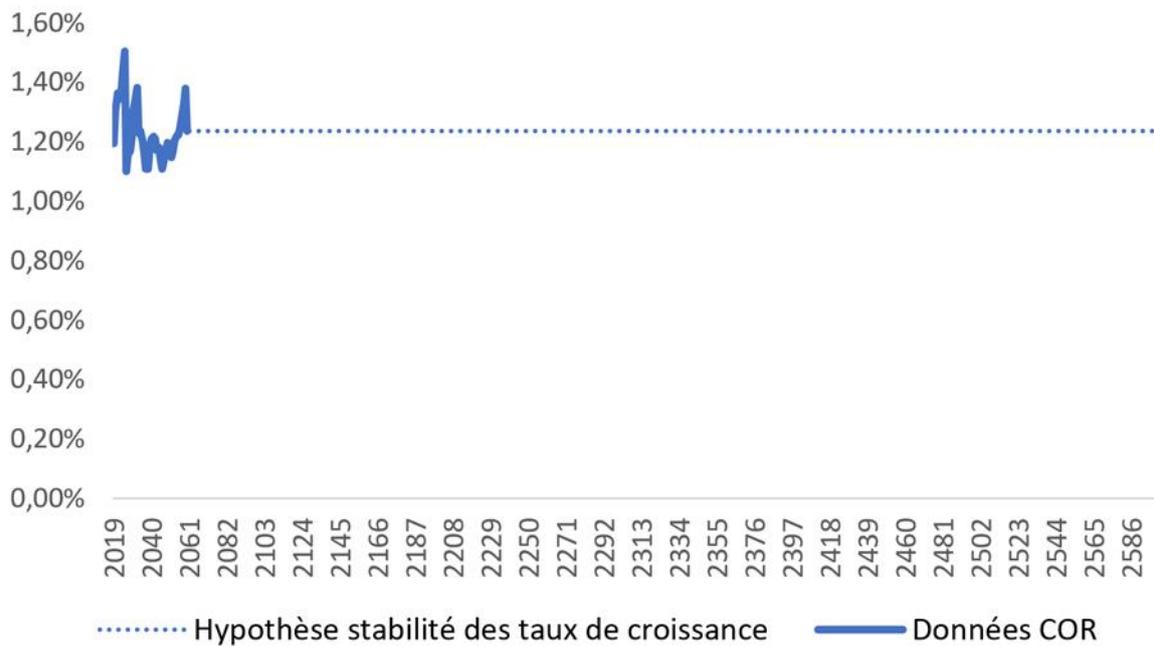
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0010-B

Figure 3.2-1 Projection de l'évolution annuelle du PIB/tête en €₂₀₁₉, de 2019 à 2060, selon les données COR et INSEE

Les recommandations officielles et notamment celles du COR étant établies jusqu'en 2060 et non au-delà, elles ne couvrent pas une période aussi longue que celle abordée par cette évaluation : après cette date, il convient donc de poser des hypothèses de croissance réalistes et cohérentes avec la définition qualitative faite du scénario OK. Nous supposons ainsi qu'un taux de croissance du PIB/tête constant et égal au taux de croissance moyen des dix dernières années (2050-2060) s'applique pour le très long terme, à savoir sur la période 2060-2600.

Ainsi, nous posons l'hypothèse d'une croissance constamment égale à la croissance des 10 dernières années fournies par le COR (2050 à 2060), égal à 1,24 %.

Le graphique ci-dessous représente l'évolution du PIB/tête entre 2019 et 2600 selon cette hypothèse.

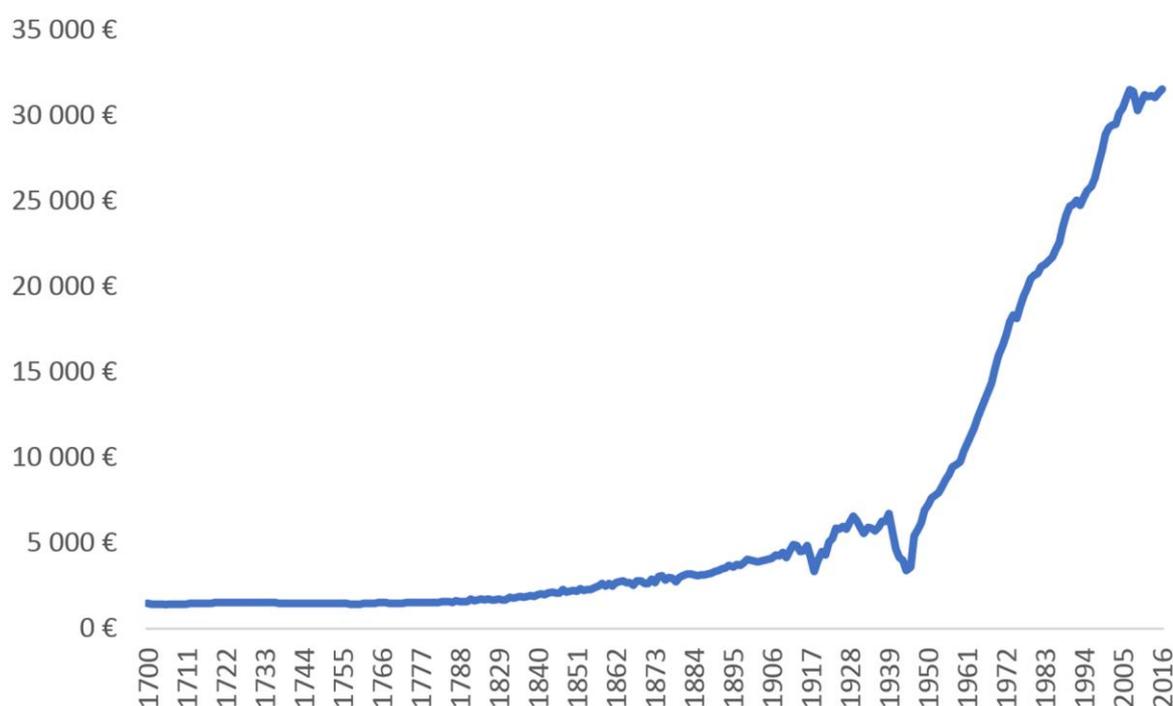


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0011-B

Figure 3.2-2 Projection du taux de croissance de PIB/tête en €2019, de 2019 à 2600, données COR et calculs des auteurs

Le maintien d'un taux de croissance positif sur environ 600 ans produit une augmentation exponentielle du PIB/tête ; celui-ci est multiplié par 30 entre 2019 et 2300, et atteint plus d'un million d'euros en 2300. En 2600, le PIB/tête atteint 40 millions d'euros.

Si l'hypothèse d'un tel niveau de richesse peut paraître déraisonnable, en première analyse, elle correspond bien aux ordres de grandeur de croissance de richesse observés par le passé. Le Maddison project database de l'Université de Groningen (41) fournit par exemple des estimations de la consommation et du taux de croissance historiques, ventilées par pays. En se basant sur ces estimations, le PIB/tête français aurait été multiplié par 23 entre le début du XVIII^e siècle et aujourd'hui.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0012-B

Figure 3.2-3 Historique du niveau de PIB/tête en France en €₂₀₁₉, de 1700 à 2019, données Maddison project database (41) et calculs des auteurs

3.2.2 Le scénario « KO »

3.2.2.1 Description qualitative du scénario KO

Le scénario dit « KO » correspond à une dégradation économique progressive, mais très durable. On suppose que sous l'effet des multiples facteurs de crise qui s'amoncelleraient en progressant vers la fin du siècle, cette dégradation finirait par entraîner une régression institutionnelle.

La notion de fragilité est de plus en plus utilisée par la communauté des bailleurs de fonds pour désigner des situations dans lesquelles le manque de développement économique d'un pays et la faiblesse de ses institutions s'amplifient mutuellement. L'OCDE, entre autres, a même mis au point une méthodologie permettant de mesurer la fragilité selon cinq dimensions (sociale, politique, environnementale, économique et de sécurité), comme « une combinaison d'exposition au risque et de capacité d'adaptation insuffisante de l'État, du système et/ou des communautés à gérer, absorber ou atténuer ces risques » (OCDE (42)).

Notre compréhension de la fragilité des États a été largement façonnée par de nombreux ouvrages en science politique et en économie sur le rôle des institutions politiques dans le développement dont un bref résumé est proposé ci-après :

Les premières enquêtes sur cette question étaient entièrement centrées sur la nature prédatrice de l'État (de type monarchie ou dictature) et concluaient naturellement que seule une forte protection des biens individuels permettait un développement à long terme (Olson, 1993 (43)). La littérature sur la « nouvelle théorie de la croissance » a poursuivi cette voie (Barro, 1996 (44) ; Acemoglu, Johnson et Robinson, 2001 (45)), mais a été rapidement critiquée par les politologues pour la rudesse de son approche institutionnelle (Haggard et Tiede, 2011 (46)).

L'accent a donc été mis sur la « séparation des institutions » ces dernières années (Acemoglu et Johnson, 2005 (47)). Dans une contribution influente, Acemoglu et Robinson (2012 (48)) ont fait valoir que ce qui

importait pour le développement à long terme était la présence d'un État doté d'une large répartition du pouvoir et de capacités²¹ importantes dans la société, une combinaison qu'ils qualifiaient d'« institutions politiques inclusives ». Les États fragiles, qui se caractérisent souvent par une faible capacité d'État et par l'exclusion d'une grande partie de la population des processus politiques, sont tout le contraire.

Les prescriptions pratiques à l'intention des États fragiles ont naturellement suivi, et l'accent mis sur la primauté du droit à la fin des années 1990 et au début des années 2000 a été remplacé par un double objectif de renforcement des capacités et de démocratisation.

Acemoglu, Robinson et Santos (2013 (49)) reviennent sur l'argument de séquençement avancé par Huntington (1968 (50)), selon lequel la formation d'un État doit être la première priorité pour que la démocratisation aboutisse. Ils montrent que lorsque l'État est faible (par exemple, lorsque des organisations criminelles ont été autorisées à s'établir dans certaines parties du territoire, comme dans plusieurs pays d'Amérique latine), les institutions démocratiques peuvent être perverties et l'État peut perdre de manière durable le monopole de la violence. En examinant les preuves empiriques, Mazzuca et Munck (2014 (51)) ont également tendance à rejeter l'argument de séquençement en faveur d'une vision dans laquelle les deux processus se renforcent et se nourrissent mutuellement (exposé par Carothers, 2007 (52)). Ainsi, la littérature la plus récente suggère un rapport de synergie entre développement économique, capacité de l'État et renforcement des institutions démocratiques.

Dès lors, le scénario KO de la présente évaluation socioéconomique suppose que la fragilité de la gouvernance, des institutions et des capacités ne permet pas un maintien des normes actuelles de sécurité des installations d'entreposage et de stockage des déchets radioactifs. La baisse des exigences de sûreté, couplée à de potentielles crises internes ou guerres externes, décuplent la probabilité d'un accident ou d'une attaque sur un site d'entreposage ou de stockage des déchets radioactifs. Par ailleurs, le faible investissement en capital humain et en R&D, corollaire d'une faible croissance économique, complique le maintien des compétences et les gains de productivité.

3.2.2.2 Modélisation de croissance du scénario KO

La modélisation de ce scénario s'éloigne fortement des hypothèses de croissance économique et de stabilité des institutions et de la gouvernance sur lesquelles se basent les recommandations quantitatives officielles. La littérature émergente émanant des champs de l'économie du développement et de l'économie néo-institutionnelle présentée précédemment fournit de grandes orientations.

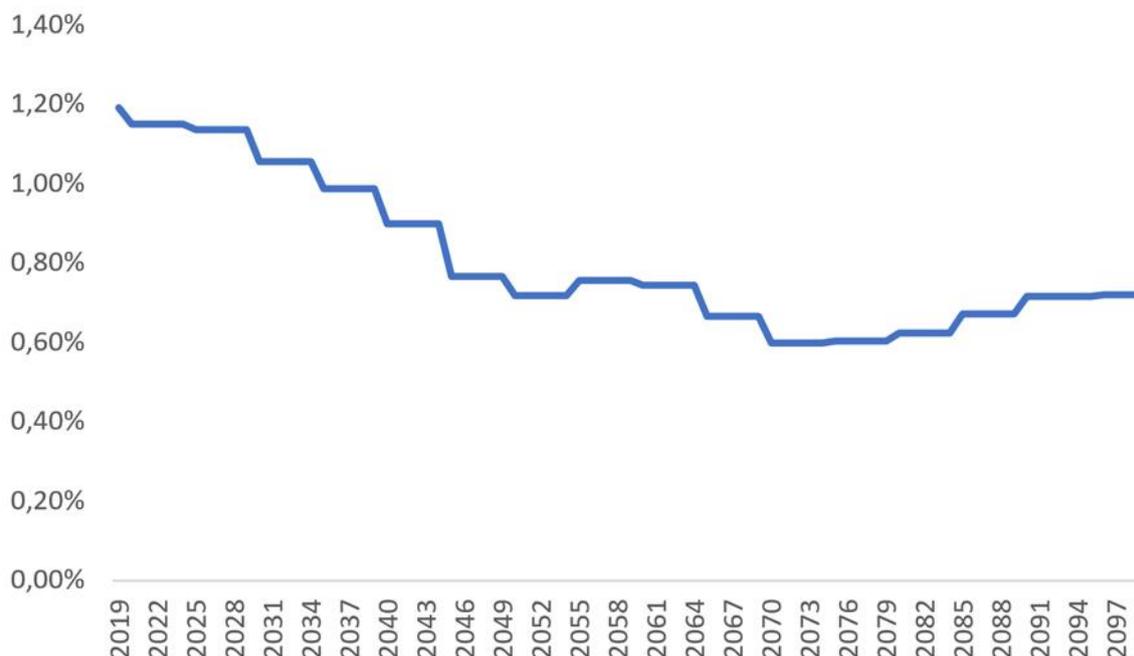
Pour formaliser quantitativement ces orientations, nous mobilisons les travaux de recherche en économie de l'environnement. Les « Shared socioeconomic pathways²² » (SSP) proposent des estimations à long terme de plusieurs variables socioéconomiques clés (population, urbanisation, éducation, croissance économique), selon cinq *scenarii* d'états du monde.

Pour la modélisation du scénario KO, c'est le scénario « rivalité régionale » (SSP3), des « Shared socioeconomic pathways », qui est retenu. C'est le SSP le moins favorable. Ce scénario décrit un monde très fragmenté, au sein duquel la *priorité* est donnée à la sécurité nationale, la coopération internationale est inexistante et peu (pas) d'actions sont prises en faveur d'un développement durable. La croissance économique y est lente, conséquence d'une réduction des échanges internationaux et d'un niveau faible

²¹ En économie du développement, les capacités renvoient à « l'aptitude des individus, des organisations et de la collectivité dans son ensemble à gérer leurs affaires avec succès » (Comité d'aide au développement de l'OCDE). Le renforcement des capacités est un processus de changement complexe, non linéaire, dans lequel aucun facteur isolé (par exemple, l'information, l'éducation, la formation, l'assistance technique, le conseil en matière de politiques publiques, etc.) ne peut expliquer à lui seul le renforcement des capacités. Il contribue à répondre aux besoins spécifiques des pays ou régions, en couvrant les trois dimensions interdépendantes des individus, des organisations et de l'environnement porteur.

²² À la fin des années 2000, des chercheurs de différentes disciplines et institutions ont commencé à développer des scénarios pour explorer les façons dont le monde pourrait évoluer d'ici à la fin du XXI^{ème} siècle. Ces *scenarii*, par pays, se distinguent par des facteurs tels que la population, la croissance économique, l'éducation, l'urbanisation et le progrès technologique, lesquels ont des effets contrastés sur la possibilité d'atténuer le changement climatique. Les « Shared socioeconomic pathways » constituent désormais une base de travail reconnue et largement utilisée pour réaliser des projections d'envergure mondiale, comme celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

de R&D. La gouvernance et les institutions sont faibles, les inégalités au sein et entre les pays sont élevées, et peu d'investissements sont consentis dans le capital humain. L'évolution du taux de croissance du PIB/tête issue de ces hypothèses est décrite dans le graphique ci-après :



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0013-B

Figure 3.2-4 Taux de croissance du PIB/tête du scénario KO de 2019 à 2100 selon les données « Shared socioeconomic pathways » (SSP3)

Bien que le scénario SSP3 soit le moins favorable des cinq *scenarii* des « Shared socioeconomic pathways » en matière de croissance économique, on note que celle-ci reste positive : une lente dégradation économique est observable sur les cinquante premières années (décroissance quasi constante du taux de croissance, mais croissance toujours positive), tandis que les prévisions à très long terme paraissent indiquer une reprise.

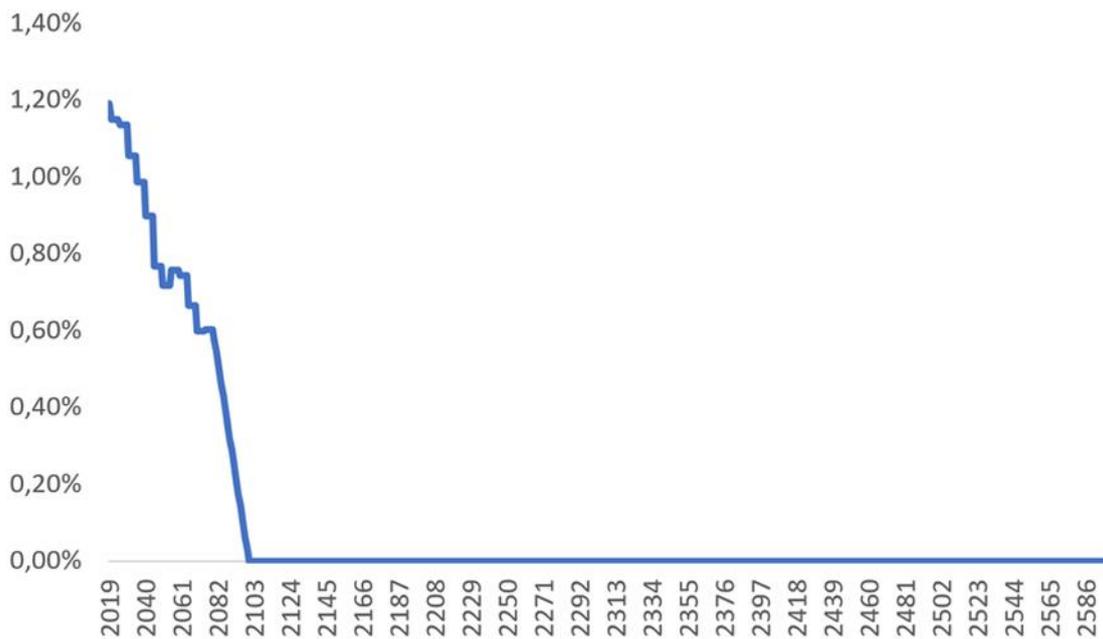
Toutefois, la littérature présentée dans le précédent chapitre suggère qu'une dégradation économique progressive mais très durable, sous l'effet des multiples facteurs de crise qui s'accumulent à l'horizon de la seconde moitié du siècle, finirait par entraîner une régression institutionnelle difficile à imaginer aujourd'hui.

Pour en tenir compte, il apparaît nécessaire d'ajouter quelques hypothèses au SSP3, en remplaçant la reprise du PIB/tête que l'on observe dans les dernières décennies du siècle par une poursuite du ralentissement, débouchant sur une croissance (par tête) nulle tout au long du siècle prochain. Notons qu'un tel scénario n'est pas du tout modélisé quantitativement dans la littérature académique. Le parti pris dans cette modélisation peut donc paraître abrupt, mais il présente l'avantage de traduire simplement les arguments d'une littérature plutôt qualitative, que des travaux académiques quantitatifs pourraient utilement compléter dans le futur.

Le scénario KO de l'évaluation socioéconomique de la solution de gestion à long terme des déchets radioactifs est réalisé en trois étapes :

- jusqu'en 2079, les taux de croissance suggérés par le SSP3 sont utilisés ;
- à partir de 2080, une réduction linéaire du taux de croissance, jusqu'à zéro en 2100, est supposée²³ ;
- à partir de 2100, le taux de croissance reste stable, en moyenne à zéro.

L'évolution du taux de croissance du PIB/tête ainsi obtenue est décrite dans le graphique ci-dessous.



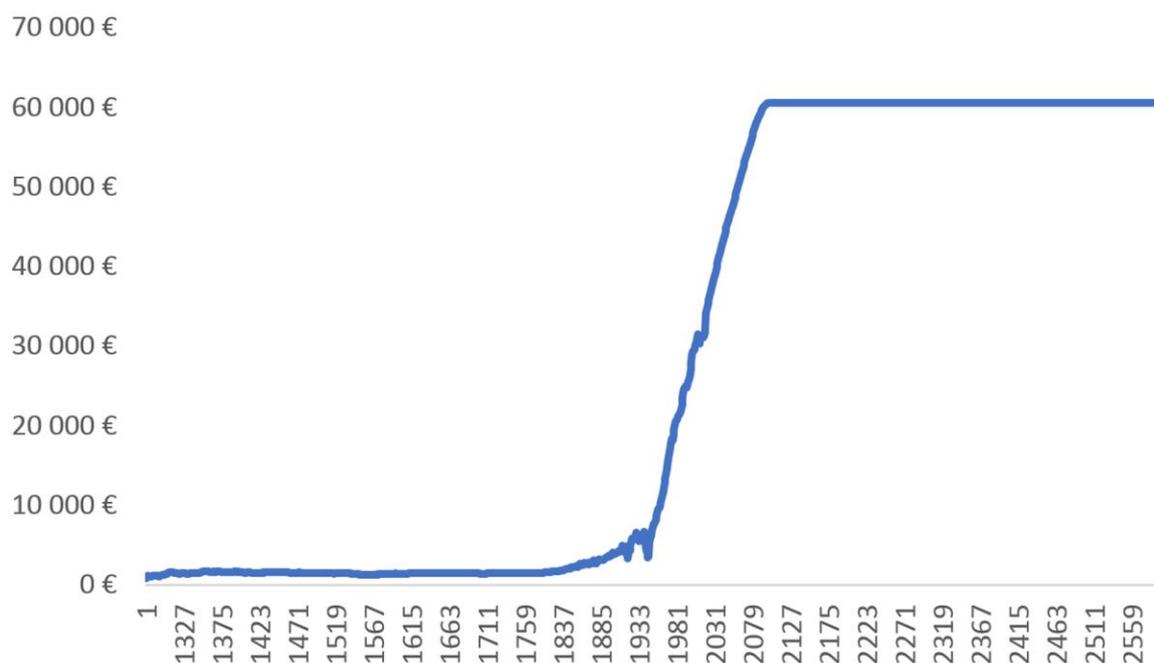
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0014-B

Figure 3.2-5 Taux de croissance du PIB/tête du scénario KO de 2019 à 2600, selon les données « Shared socioeconomic pathways » (SSP3) et calculs des auteurs

Ce scénario revient à postuler que le système actuel, qui a permis une croissance exponentielle entre la fin du XVIII^e siècle et aujourd'hui, est arrivé à bout de souffle ; une croissance en moyenne proche de zéro, semblable à l'évolution précédant le XIX^e siècle, redeviendrait la norme. Ceci est illustré par la figure 3.2-6 ci-après, rétroactivement depuis l'an 1280²⁴ jusqu'en 2019, et prospectivement jusqu'en 2600.

²³ Alors que les projections des *Shared Socioeconomic Pathways* vont jusqu'en 2100, nous les « coupons » à 2080. En effet, dans le SSP3, au-delà de 2080, les taux de croissance ont tendance à croître à nouveau, ce qui n'est pas cohérent avec le scénario KO décrit qualitativement plus haut. Un premier palier de modélisation du scénario KO est donc en 2080, et un second en 2100, qui est, schématiquement, l'année à partir de laquelle l'effritement commence à produire des effets.

²⁴ Il n'existe pas de données relatives à la croissance économique avant cette date.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0015-B

Figure 3.2-6 Récapitulatif du niveau de PIB/tête en France en €₂₀₁₉, de 1280 à 2019, selon les données Maddison project database (41), et projection jusqu'en 2600, selon les calculs des auteurs

Rappelons qu'en scénario KO, l'affaiblissement de la croissance a pour conséquence un affaiblissement des institutions et des normes. On peut donc s'attendre post 2100, à un étiolement des normes, dont on verra qu'elles pourraient avoir, si celles-ci sont durablement fragilisées, des conséquences sur la sûreté des installations de gestion des déchets radioactifs.

3.2.3 Scenarii et prix relatifs

3.2.3.1 Cadre théorique des prix relatifs

Les différents *scenarii* de croissance devraient avoir des implications sur les prix des différentes composantes étudiées dans ce rapport, tels que les coûts de génie civil, les coûts de maintien des compétences et de recherche, les évolutions des coûts associés aux risques, etc.

Parmi les évolutions de prix²⁵, on peut imaginer qu'une partie soit dépendante du PIB, et une partie indépendante du PIB, comme les prix de composants résultant de changements technologiques.

Ces évolutions sont mal connues pour le passé, et difficiles à prévoir pour l'avenir. En outre, la littérature académique sur le sujet n'est pas très extensive, hormis à nouveau en économie du développement. Deacon (2003 (53)) montre un lien positif entre le niveau de démocratie, la force des institutions, la qualité de la gouvernance et la performance environnementale. On déduit ainsi rapidement une corrélation positive entre richesse d'une nation et intensité des normes : plus la richesse est importante, plus les normes sont contraignantes et donc les prix élevés, et *vice versa*.

D'autres prix pourraient être négativement corrélés au PIB. Par exemple, grâce au progrès technologique des sociétés en croissance, on peut réaliser des gains de productivité, qui mènent à une décroissance des prix. Toutefois, dans le secteur concerné par cette évaluation, malgré le progrès technologique, on

²⁵ La notion de prix est associée à un bien ou service, tandis que la notion de coût est associée à la multiplication du prix par la quantité.

fait l'hypothèse que la hausse des normes l'emporte sur le gain de productivité d'un même paramètre en scénario OK.

Même si la sévérité d'une norme n'a jamais été totalement expliquée par la croissance, l'hypothèse sera posée, dans cette évaluation d'une évolution de tous les prix positivement corrélés (dans une ampleur plus ou moins grande) à la croissance.

3.2.3.2 Évolution des prix relatifs de l'évaluation

L'évaluation socioéconomique de Cigéo et de ses options alternatives sera réalisée dans deux cadres différents : dans le cadre du scénario OK, puis dans le cadre du scénario KO. Les prix des différentes options devront donc évoluer en fonction des taux de croissance de chaque scénario. Ils évolueront également en fonction de l'élasticité des flux du projet au PIB. Cette élasticité des flux du projet au PIB est appelée bêta (β). La valeur du bêta ne dépend donc pas de la valeur du PIB, mais du fait que le projet soit ou non corrélé au PIB. Si le projet est très corrélé au PIB dans le sens où il permet de contrer les effets d'une récession (projet dit contra-cyclique), le bêta est négatif ; s'il n'est pas dépendant du PIB, le bêta est nul ; enfin si plus le PIB baisse, plus les flux du projet baissent et réduisent l'intérêt du projet (projet dit cyclique), alors le bêta est positif.

Deux grands types de flux sont concernés : les flux liés au génie civil et les flux liés à la recherche et au maintien des compétences, qui n'ont intuitivement pas la même élasticité au PIB. Les valeurs des bêtas sont quant à elles définies ci-après.

Notons que les fourchettes hautes des élasticités au PIB donnent lieu à une croissance forte et rapide du coût des biens et des connaissances. Si ces évolutions sont plausibles sur un temps court, elles ne le sont plus à moyen et long terme ; un bien dont le prix croîtrait plus vite que le PIB concentrerait à terme tous les efforts productifs, ce qui est absurde.

Par ailleurs, le maintien d'élasticités fortes sur la durée de vie du projet, couplé à des taux d'actualisation décroissants (voir chapitre ci-dessous), signifie que le taux de croissance des bénéfices est supérieur au taux d'actualisation.

Afin de remédier à ce problème, deux solutions, possiblement couplées, sont envisageables :

- réduire le taux de croissance ;
- réduire l'élasticité unitaire.

Il n'est pas apparu opportun de réduire le taux de croissance, dans la mesure où il s'agit d'un élément fondamental de distinction entre les *scenarii*. L'option de réduction de l'élasticité au PIB du génie civil et de réduction de l'élasticité au PIB de la recherche et maintien des compétences a été préférée.

Afin de modéliser cette évolution des élasticités, trois périodes ont été définies, en cohérence avec les périodes définies pour la modélisation du taux d'actualisation (voir chapitre ci-dessous) : 2019-2070, 2070-2170 et 2170 à 2600.

a) Valeurs des bêtas en scénario OK

- Valeurs des bêtas entre 2019 et 2070 :

Pour les coûts liés au génie civil, deux facteurs sont à prendre en compte : l'effet « quantité » (par exemple, le nombre de mètres cubes de béton nécessaire à la construction du centre de stockage Cigéo) et l'effet « prix » (par exemple, le prix d'un mètre cube de béton). En utilisant pour cet exemple l'hypothèse simplificatrice que seule une quantité x de béton au prix p est nécessaire, alors le coût lié au génie civil du centre de stockage Cigéo est égal à $p \cdot x$.

Nous ne disposons pas d'indice de la productivité dans le génie civil à contenu constant, mais il ne semble pas que cette productivité soit très différente de la productivité moyenne ; cela conduit à

penser que le terme correspondant est voisin de zéro, par exemple entre -0,25 et 0,25 % par an et que cette évolution est indépendante du PIB.

Quant à l'évolution du contenu des travaux, l'expérience montre que pour un même objet les normes sont de plus en plus contraignantes et la recherche d'améliorations implique des hausses de coûts considérables des ouvrages publics, d'au moins 1 à 2 % par an (à dire d'expert). Elles correspondent à une amélioration du service rendu, et donc sont accompagnées d'une augmentation du surplus collectif ; mais il est probable qu'une part importante de ces augmentations de coûts aille au-delà de ce qui serait justifié par la maximisation du surplus collectif. Il est probable qu'une partie des hausses du coût soit liée au PIB, et qu'une autre partie soit indépendante du PIB.

Pour ne pas complexifier outre mesure l'analyse, et insérer des hypothèses de divergence artificiellement précises entre les *scenarii*, nous choisissons de ne retenir qu'une évolution liée au PIB, avec une élasticité comprise dans une fourchette large (à court terme avant 2070) :

- ✓ une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB de 0,1 ;
- ✓ une hypothèse intermédiaire correspondant à une élasticité au PIB de 0,8 ;
- ✓ une hypothèse haute correspondant à une élasticité au PIB de 1,5.

Pour les coûts liés au maintien des compétences et à la recherche, on note en premier lieu que l'on raisonne à objectif fixé, par exemple, le fait de trouver une solution technologique ou un nouveau site de stockage. Un raisonnement qualitatif donne à penser que, si le PIB augmente, le nombre d'heures de recherche pour trouver un résultat donné devrait plutôt diminuer, puisqu'on s'appuiera sur davantage de ressources et de résultats de recherche obtenus par ailleurs pour mener cette recherche, d'où une élasticité de la « quantité » de recherche nécessaire pour atteindre l'objectif fixé par rapport au PIB ; il paraît raisonnable de penser que cette élasticité est faiblement négative ; on peut prendre une fourchette de l'ordre de -0,5 (quand le PIB augmente de 10 %, la quantité de recherche nécessaire diminue de 5 %) à 0 (la quantité de recherche est indépendante du PIB). Par ailleurs, si le nombre d'heures de recherche diminue ou augmente peu, le coût d'une heure de recherche devrait augmenter, correspondant à l'augmentation du salaire de chercheur à prix constants, avec une élasticité de, disons un peu moins que 1 et d'environ 0,7, au PIB : lorsque le PIB augmente de 3 %, le salaire des chercheurs augmente de 2 %.

Ceci devrait conduire à penser que l'élasticité de ce coût de la recherche est située entre 0,2 et 0,7, arrondi à la fourchette [0 ;1]. Ainsi, nous mobilisons, comme pour le génie civil, trois hypothèses d'élasticité au PIB des coûts liés au maintien des compétences et à la recherche (jusqu'en 2070) :

- ✓ une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB de 0 ;
- ✓ une hypothèse intermédiaire correspondant à une élasticité au PIB de 0,5 ;
- ✓ une hypothèse haute correspondant à une élasticité au PIB de 1.

- Entre 2070 et 2170 :

Ainsi, les hypothèses suivantes sont retenues pour les **coûts liés au génie civil** à moyen terme (entre 2070 et 2170) :

- ✓ une hypothèse basse maintenant l'élasticité au PIB à 0,1 ;
- ✓ une hypothèse intermédiaire correspondant à une baisse linéaire de l'élasticité au PIB jusqu'à 0,2 ;
- ✓ une hypothèse haute correspondant à une baisse de l'élasticité au PIB jusqu'à 0,3.

Pour les **dépenses liées au maintien des compétences et à la recherche**, les hypothèses suivantes d'évolution des prix à moyen terme (entre 2070 et 2170) sont posées :

- ✓ une hypothèse basse qui maintient l'élasticité au PIB nulle ;
- ✓ une hypothèse intermédiaire correspondant à une élasticité au PIB de 0,05 ;
- ✓ une hypothèse haute correspondant à une élasticité au PIB de 0,1.

- Après 2170

Après 2170, on considère que les élasticités au PIB sont constantes et basses, notamment en raison de la réduction de la sévèrisation des normes ; sans plus d'information sur leur évolution possible, nous posons ainsi une hypothèse de stabilité par rapport aux hypothèses prises sur la période antérieure (entre 2070 et 2170).

b) Valeurs des bêtas en scénario KO

Dans le scénario KO, les valeurs à court et long terme des bêtas sont identiques à celles du scénario OK, mais leur évolution diffère. En effet, la réduction linéaire entre valeur à court terme et long terme est enclenchée dès 2019 dans le scénario KO, tout comme la réduction du taux de croissance de ce scénario, et du taux d'actualisation (voir chapitre ci-dessous). Cette réduction du bêta reflète ainsi le délitement progressif de la société jusqu'en 2100, hypothèse de construction qualitative et quantitative de ce scénario.

Nous obtenons ainsi les évolutions suivantes :

- Pour le génie civil :
 - ✓ une hypothèse haute de 1,5 en 2019, réduite linéairement à 0,3 entre 2020 et 2099, et stable à 0,3 à partir de 2100 ;
 - ✓ une hypothèse basse de 0,1, stable sur la durée de l'étude ;
 - ✓ une hypothèse intermédiaire de 0,8 en 2019, réduite linéairement à 0,2 entre 2020 et 2099, et stable à 0,2 à partir de 2100.
- Pour le maintien des compétences et la recherche :
 - ✓ une hypothèse haute de 1 en 2019, réduite linéairement à 0,1 entre 2020 et 2099, et stable à 0,1 à partir de 2100 ;
 - ✓ une hypothèse basse de 0, stable sur la durée de l'étude ;
 - ✓ une hypothèse intermédiaire de 0,5 en 2019, réduite linéairement à 0,05 entre 2020 et 2099, et stable à 0,05 à partir de 2100.

c) Résumé des valeurs des bêtas

Le tableau ci-dessous résume les valeurs prises par les bêtas en scénario OK

Tableau 3.2-1 *Résumé des valeurs des bêtas socioéconomiques en scénario OK*

Type de flux	Période	Valeur basse	Valeur intermédiaire	Valeur haute
Flux liés au génie civil	De 2019 à 2070	0,1	0,8	1,5
	Entre 2070 et 2170	0,1	Baisse linéaire jusqu'à 0,2	Baisse linéaire jusqu'à 0,3
	Après 2170	0,1	0,2	0,3
Flux liés à la recherche et au maintien des compétences	De 2019 à 2070	0	0,5	1
	Entre 2070 et 2170	0	Baisse linéaire jusqu'à 0,05	Baisse linéaire jusqu'à 0,1
	Après 2170	0	0,05	0,1

Le tableau ci-dessous résume les valeurs prises par les bêtas en scénario KO

Tableau 3.2-2 *Résumé des valeurs des bêtas socioéconomiques en scénario KO*

Type de flux	Période	Valeur basse	Valeur intermédiaire	Valeur haute
Flux liés au génie civil	De 2019 à 2100	0,1	Décroissance linéaire de 0,8 à 0,2	Décroissance linéaire de 1,5 à 0,3
	Après 2100	0,1	0,2	0,3
Flux liés à la recherche et au maintien des compétences	De 2019 à 2100	0	Décroissance linéaire de 0,5 à 0,05	Décroissance linéaire de 1 à 0,1
	Après 2100	0	0,05	0,1

d) **Calcul du coefficient de prix relatif**

Sur la base des taux de croissance définis dans le chapitre 3.2 et des bêtas définis ci-avant, un coefficient de prix relatif est estimé afin d'appliquer l'évolution des prix relatifs aux coûts bruts.

- Pour l'année 2019, le coefficient est estimé par la formule :

$$\text{Coefficient d'évolution des prix relatifs}_{2019} = 100 \% * (1 + \text{taux de croissance})^{\beta}$$

- Pour les années suivantes, le coefficient est estimé par la formule :

$$\text{Coefficient d'évolution des prix relatifs}_n = \text{coefficient d'évolution des prix relatifs}_{n-1} * (1 + \text{taux de croissance})^{\beta}$$

3.3 Valorisation du temps long et actualisation

Comme présenté succinctement dans le chapitre 1 relatif à la méthodologie de l'évaluation socioéconomique, le système d'actualisation permet de ramener à une même date des flux monétaires intervenant à des années différentes, et donc de faire l'arbitrage entre le présent et le futur :

- un taux élevé donne un faible poids aux coûts et aux bénéfices intervenant dans le futur ;
- un taux faible attribue un poids élevé aux coûts et aux bénéfices intervenant dans le futur.

Le choix du système d'actualisation est important. Une définition plus détaillée des composantes du taux d'actualisation fait l'objet du chapitre 3.3.1, tandis que le chapitre 3.3.2 du présent document, étaye les choix réalisés pour les taux retenus. Par ailleurs, les fondements théoriques du taux d'actualisation sont détaillés en annexe 14.

3.3.1 Actualisation : définition et discussion

Le taux d'actualisation socioéconomique est composé de deux termes : le taux sans risque et la prime de risque, qui seront définis dans les chapitres ci-après. Il répond à la formule suivante :

$$\text{Taux d'actualisation} = \text{taux sans risque} + \text{prime de risque}$$

Notons qu'il existe une distinction entre la notion de taux d'actualisation économique présentée dans le chapitre « Calcul du coefficient de prix relatif » du présent document, et la notion de taux d'actualisation comptable. Le taux d'actualisation comptable est encadré par des normes comptables et son utilisation est prévue par la loi, notamment dans le cadre du calcul des provisions pour le démantèlement des centrales nucléaires et la gestion des déchets radioactifs, dans lequel le projet global Cigéo s'inscrit. Ces deux notions, et les chiffres résultants des calculs associés peuvent donc diverger.

3.3.1.1 Le taux sans risque

Le taux d'actualisation dit « sans risque » est indépendant du projet. En suivant la formule de Ramsey, il est noté :

$$r_f = \gamma\mu + \delta$$

Le taux d'actualisation sans risque (r_f) permet ainsi de refléter :

- **Le taux de préférence pure pour le présent (δ)** : cela représente le fait qu'une utilité immédiate est en général préférée à la même utilité, toute chose égale par ailleurs, dans le futur. Il s'agit donc d'un taux qui reflète l'impatience des agents économiques, ainsi que leur « probabilité de mourir ». Ainsi, plus grande est la préférence pour le présent, plus élevé doit être le taux d'actualisation.
- **L'« effet richesse » ($\gamma\mu$)**, composé de deux paramètres : les anticipations portant sur la croissance économique et l'élasticité marginale de la consommation. L'effet richesse reflète le comportement procyclique du taux d'intérêt observé sur les marchés financiers. Ainsi, plus on anticipe une croissance forte, plus le taux d'actualisation est élevé. En effet, avec une croissance forte, les générations futures auront les moyens de faire face à des coûts futurs élevés.
- **L'« effet de précaution »** est pris en compte dans la règle de Ramsey étendue. Il reflète notre volonté d'épargner (investir) lorsque notre futur est incertain, plutôt que de consommer aujourd'hui ; il aura donc tendance à diminuer le taux d'actualisation. Ainsi, plus incertaine est la croissance, plus le taux d'actualisation est faible.

Pour résumer, plus le décideur est patient, pessimiste et incertain sur la croissance future, plus il convient de retenir un taux d'actualisation faible.

Les valeurs de ces différents paramètres ne font pas l'unanimité et sont régulièrement discutées et mises à jour. Par exemple, en France, le rapport Lebègue (Baumstark, Hirtzman, Lebègue, 2005 (54)) propose un taux de préférence pur pour le présent (delta) $\delta = 1\%$, tandis que Stern (2007 (17)) note que, si le projet porte sur plusieurs générations, l'utilisation de $\delta > 0$ ne peut être justifiée que pour incorporer le risque de disparition de l'humanité²⁶. Gollier (2016 (55)) propose de fixer $\delta = 0$.

Ainsi, si le taux de préférence pure pour le présent δ est supposé nul, le taux d'actualisation est donc déterminé par deux effets contradictoires : un « effet richesse », qui aura tendance à augmenter le taux d'actualisation ; un « effet de précaution », qui aura tendance à le diminuer.

Gollier (2016 (55)) propose, pour la France, de retenir un taux sans risque de 2,5 % à 3 %. Ce taux, équivalant à moins du double de la croissance anticipée de la consommation (afin de tenir compte de l'effet de précaution et de la non-normalité de la distribution des taux de croissance) devrait être utilisé à moins de 20 ans, et devrait ensuite décroître vers 1 % pour les flux les plus lointains (au-delà de 100 ans).

Le rapport Quinet (2013 (11)), dont est issu le guide méthodologique sur l'évaluation socioéconomique des investissements publics, propose une valeur du taux sans risque de 2,5 % jusqu'en 2070, et de 1,5 % pour les années suivantes. Comme nous le verrons dans le chapitre sur l'application du taux d'actualisation, nous partons du taux d'actualisation recommandé par Quinet et en proposons un ajustement, dans une borne basse et dans une borne intermédiaire.

3.3.1.2 La prime de risque

La prime de risque est le produit de deux termes : la corrélation entre les flux du projet et l'évolution du PIB (bêta socioéconomique) et la volatilité macroéconomique (phi) ; on réserve parfois l'appellation de prime de risque au paramètre phi.

Le coefficient β , appelé « bêta socioéconomique », a déjà été défini dans le chapitre 3.2.3 du présent document, c'est l'élasticité au PIB des coûts et bénéfices du projet. Sa valeur ne dépend pas de la valeur du PIB, mais du fait que le projet soit ou non corrélé au PIB. Si le projet est très corrélé au PIB avec une corrélation négative - le bêta est négatif - alors le projet permet de contrer les effets d'une récession (projet contra-cyclique) ; s'il n'est pas dépendant du PIB, le bêta est nul ; enfin si le bêta est positif alors les effets du projet sont amplifiés par les mouvements du PIB : par exemple, si le PIB augmente, l'actualisation des flux du projets conduit à réduire en valeur absolue les coûts (ou bénéfices) par rapport à une situation où le bêta du projet serait plus faible. De ce fait, les coûts et bénéfices de long terme sont écrasés. Cet effet est contrecarré par le fait qu'au numérateur de la VAN, la présence d'un bêta positif augmente (mais en général à un moindre degré) l'espérance du coût ou du bénéfice.

Le coefficient φ (phi) (avec $\varphi = \gamma\sigma^2$ dans le modèle de Ramsey) combine l'aversion au risque γ (gamma), et la volatilité macroéconomique du PIB σ^2 (sigma²). Il exprime la sensibilité au risque de la collectivité nationale.

3.3.1.3 Le taux d'actualisation

Mathématiquement, le taux d'actualisation s'exprime de la façon suivante :

$$r = r_f + \beta\varphi$$

Où r_f est le taux sans risque et $\beta\varphi$ est la prime de risque. On comprend alors que :

²⁶ Stern (2007 (17)) utilise par exemple $\delta = 0,1\%$, correspondant selon lui à la probabilité de disparition de l'humanité dans les 12 prochains mois.

- si aucune volatilité macroéconomique n'existe (peu réaliste, ou dans le cas où la société tend vers un comportement neutre au risque), φ est égal à (tend vers) 0, et le système d'actualisation est égal au (tend vers le) taux sans risque ;
- si aucune corrélation entre le projet et le risque macroéconomique n'existe, $\beta = 0$ et le système d'actualisation est de nouveau égal au taux sans risque ;
- si la corrélation entre le projet et le risque économique est parfaite, $\beta = 1$ (respectivement $\beta = -1$) ; les bénéfices du projet baissent (respectivement, augmentent) de 1 % dès que le PIB baisse de 1 % ;

Ainsi, un projet contra-cyclique se verra attribuer une prime sous forme d'une minoration du taux d'actualisation, soit donc une valorisation plus haute des coûts ou bénéfices futurs, là où un projet positivement corrélé à l'évolution du PIB se verra minorer ses coûts ou ses bénéfices futurs, par le biais d'une majoration du taux d'actualisation.

Le rapport Quinet (2013 (11)) reprend les conclusions principales du rapport Gollier (2011 (56)) et soutient le besoin d'intégrer une prime de risque systémique. La prime de risque γ est fixée à 2 % jusqu'en 2070, puis à 3 % au-delà. Comme pour le taux sans risque, nous prenons le parti, dans cette évaluation socioéconomique, de proposer une borne haute, une borne basse et une borne intermédiaire de la prime de risque, afin de tenir compte des spécificités temporelles de la gestion des déchets radioactifs et de l'incertitude relative à sa corrélation au risque macroéconomique.

3.3.2 Choix des taux d'actualisation utilisés au sein des *scenarii* de référence de l'évaluation

L'estimation exacte de taux d'actualisation, se basant sur des données d'entrées précises, pour les *scenarii* OK et KO est hors du champ de cette étude ; par ailleurs, la crédibilité de données portant sur la croissance et la volatilité de l'économie française aux horizons envisagés serait discutable.

Toutefois, nous pouvons nous appuyer sur (i) les informations issues des *scenarii* modélisés et (ii) le cadre théorique exposé ci-dessus afin d'approximer, et fournir des intervalles de confiance, pour chacun de ces *scenarii*.

3.3.2.1 Scénario OK

Pour rappel, le scénario OK correspond à une application des recommandations officielles jusqu'en 2060, soit les prévisions du taux de croissance du PIB/habitant telles que fournies par le COR. Au-delà de cette date, il n'existe pas de données officielles sur lesquelles bâtir ce scénario. Ainsi, pour la période 2060-2600, nous posons l'hypothèse d'une croissance constamment égale à la croissance des 10 dernières années fournies par le COR (2050 à 2060), égal à 1,24 %.

a. Le taux sans risque à court-terme (jusqu'en 2070)

Le rapport Quinet (2013 (11)), propose un taux sans risque compris entre 2,5 % et 3 % jusqu'en 2070. Ce rapport considère l'existence d'une préférence pour le présent (taux de préférence pure pour le présent différent de zéro, positif). Concernant les taux de croissance du PIB/tête, le rapport Quinet se base sur les projections du COR, comprises entre 1,2 % à 2,3 % sur la période 2010 à 2030, ainsi que sur les projections de l'OCDE, comprises entre 1,6 % (2011-2030) et 1,3 % (2011-2060). Gollier (2016 (55)), en se basant sur des taux historiques de croissance de 1,75 % et de volatilité de 1,57 %, propose également un taux sans risque autour de 2,5 % à 3 %.

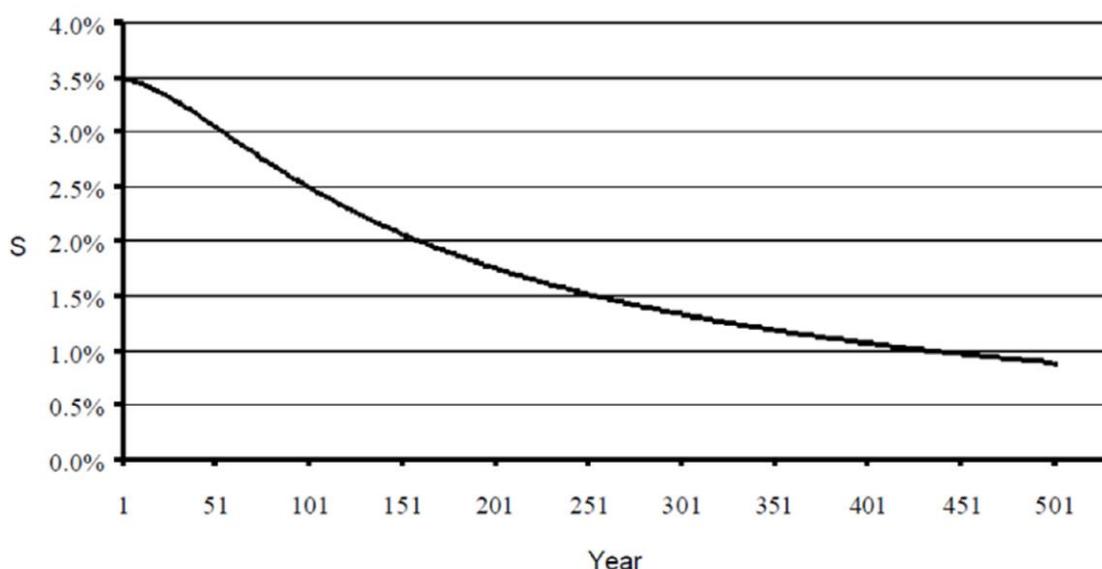
Pour ce scénario OK, nous nous basons sur les recommandations officielles et retenons un taux sans risque de 2,5 % sur le court terme, tel que défini par le rapport Quinet (jusqu'en 2070). Toutefois, depuis la date de fixation de ces valeurs, les taux d'intérêt financiers sans risque, qui sont une référence pour les taux d'actualisation socioéconomiques sans risque, n'ont cessé de baisser, au point de devenir négatifs ; parallèlement les taux de croissance de l'économie, qui commandent l'effet richesse dans la formule de Ramsey, se sont réduits. Ceci conduit à envisager une variante à

taux plus faible, par exemple 2 % de taux sans risque pour la borne basse en scénario OK. Un taux sans risque intermédiaire est également proposé ; celui-ci est simplement égal à la moyenne des taux élevés et faibles, soit 2,25 %.

b. Le taux sans risque après 2070

Le rapport Quinet (2013 (11)) propose de fixer une année de bascule à 2070 ; le taux sans risque connaît en 2071 une rupture relativement brutale, et chute à 1,5 %. Aucune recommandation n'est fournie pour l'évolution du taux sans risque après cette période.

En nous appuyant sur la littérature existante, on note que différentes considérations militent pour une baisse continue du taux d'actualisation à long et très long terme. Elles peuvent résulter d'abord, dans le cadre de la formule de Ramsey, d'une baisse du taux de croissance de l'économie, donc d'une réduction de l'effet richesse ; actuellement on assiste effectivement à une réduction des taux de croissance par rapport à ce qu'ils étaient il y a une ou plusieurs décennies. L'autre raison, plus générale, tient à l'incertitude sur le futur. Cet argument, présenté sous forme simple dans le rapport Lebègue (2005 (54)), a été développé par de nombreux auteurs (Weitzman, Gollier, Freeman, Groom, etc.) et est synthétisé dans Arrow and *alii* (2014 (57)). Il a été adopté par plusieurs pays, en particulier le Royaume-Uni et la France.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0016-A

Source: Adapted from Newell and Pizer.

Figure 3.3-1 Courbe du taux de préférence pour le présent

Dans cette littérature, on remarque que les taux baissent de 1 point tous les 100 ans, dans les formulations du rapport Lebègue (2005 (54)), dans « The green book » (2018 (58)) ainsi que dans le rapport Oxera (2002 (59)) ; et de 2 points dans les calculs réalisés à partir des prévisions présentées par Christensen and *alii* (2018 (60)).

Nous retenons ainsi, pour la borne haute, un taux sans risque de 2,5 % jusqu'en 2070, tel que recommandé par le rapport Quinet. Puis, nous faisons évoluer ce taux linéairement vers 1,5 % en 2170 (réduction linéaire de 1 point de pourcentage sur 100 ans), puis vers 1 % en 2270 et stable au-delà. Cette borne représentant l'estimation haute, il est paru opportun de ne pas réduire le taux à moins de 1 (notamment pour refléter une possible préférence pour le présent) (59).

Pour la borne basse, un raisonnement similaire est appliqué : un taux sans risque de 2 % jusqu'en 2070, réduit linéairement vers 0,1 % en 2170 (soit la borne haute du rythme de décroissance de 2 points sur les 100 premières années). Le taux sans risque reste stable à 0,1 % jusqu'à la fin de la période d'évaluation.

Outre les bornes haute et basse du taux sans risque, nous modélisons également un taux sans risque intermédiaire. Comme pour les bornes haute et basse, le taux est constant jusqu'en 2070. Ici il

s'élève à 2,25 %. Puis, il baisse linéairement vers 1 % entre 2070 et 2170, puis vers 0,5 % entre 2170 et 2270, et il est stable au-delà.

Ce taux sans risque intermédiaire - répond à deux objectifs :

- ✓ modéliser un rythme de décroissance du taux sans risque sur le long terme plus faible que la borne basse, similaire à celui formulé par les rapports Lebègue (54) et Oxera (59) ainsi que par « The green book » (58) ;
- ✓ tester la sensibilité des résultats à un taux situé entre les bornes « haute » et « basse », qui représentent des choix de modélisation très prononcés.

Le tableau suivant résume les choix de taux sans risque, en bornes haute, basse, et intermédiaire pour le scénario OK, aux différentes périodes considérées :

Tableau 3.3-1 Taux sans risque, dans le scénario OK

Taux sans risque	Jusqu'en 2070	En 2170 ²⁷	À partir de 2270
Taux sans risque haut	2,5 %	1,5 %	1,0 %
Taux sans risque intermédiaire	2,25 %	1,0 %	0,5 %
Taux sans risque bas	2,0 %	0,1 %	0,1 %

c. La prime de risque

Pour rappel, la prime de risque est définie comme le produit :

$$\beta\varphi$$

Où β est l'élasticité des flux annuels du projet par rapport au PIB par tête, et φ l'aversion de la collectivité pour le risque.

Le rapport Quinet recommande $\varphi = 2$ jusqu'en 2070, suivie par $\varphi = 3$. A dire d'experts, les prochaines révisions de φ seraient à la baisse.

Ainsi, nous mobilisons :

- ✓ en borne haute les recommandations du rapport Quinet : $\varphi = 2$ jusqu'en 2070, il augmente linéairement jusqu'à 3 en 2170, puis nous le considérons stable au-delà. ;
- ✓ pour la borne basse, nous mobilisons $\varphi = 1$ jusqu'en 2070, puis il augmente linéairement jusqu'à $\varphi = 2$ en 2170, puis il est stable au-delà ;
- ✓ pour la borne intermédiaire, la moyenne des deux valeurs, soit $\varphi = 1,5$ jusqu'en 2070, puis augmentation linéaire jusqu'à $\varphi = 2,5$ en 2170, puis il est stable au-delà.

Les β quant à eux, ont été définis dans le chapitre 3.2.3.2 du présent document sur l'évolution des prix relatifs (élasticité des prix au PIB).

Pour rappel, les valeurs suivantes ont été retenues en scénario OK :

- ✓ pour les flux liés au génie civil :
 - De 2019 à 2070 :
 - une hypothèse haute correspondant à une élasticité au PIB de 1,5 ;
 - une hypothèse intermédiaire correspondant à une élasticité au PIB de 0,8 ;
 - une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB de 0,1.

Entre 2070 et 2170 :

²⁷ Le taux est stable jusqu'en 2070 ; puis entre 2070 et 2170, il décroît linéairement pour atteindre 1,5 % en borne haute en 2170: puis il décroît à nouveau linéairement jusqu'en 2270 pour atteindre 1 %, année à partir de laquelle ce taux sans risque est stable.

- une hypothèse haute correspondant à une décroissance linéaire de l'élasticité au PIB vers 0,3 en 2170 ;
 - une hypothèse intermédiaire correspondant à une décroissance linéaire de l'élasticité au PIB vers 0,2 en 2170 ;
 - une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB maintenue à 0,1.
 - À partir de 2170, les bêtas des flux liés au génie civil sont stables (0,3 ; 0,2 et 0,1 correspondant respectivement à l'hypothèse haute, intermédiaire et basse).
- ✓ pour les dépenses liées au maintien des compétences et à la recherche :
- De 2019 à 2070 :
- une hypothèse haute correspondant à une élasticité au PIB de 1 ;
 - une hypothèse intermédiaire correspondant à une élasticité au PIB de 0,5 ;
 - une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB de 0.
- Entre 2070 et 2170
- une hypothèse haute correspondant à une baisse linéaire de l'élasticité au PIB qui tend vers 0,1 en 2170 ;
 - une hypothèse intermédiaire correspondant à une baisse linéaire de l'élasticité au PIB qui tend vers 0,05 en 2170 ;
 - une hypothèse basse correspondant à une élasticité au PIB maintenue à 0.
- A partir de 2170, les bêtas des flux liés à la recherche et au maintien des compétences sont stables (0,1 ; 0,05 et 0 correspondant respectivement à l'hypothèse haute, intermédiaire et basse).

d. Résumé des taux d'actualisation retenus en scénario OK

Nous proposons ainsi de retenir une fourchette relativement large des taux d'actualisation possibles, représentés dans le tableau suivant :

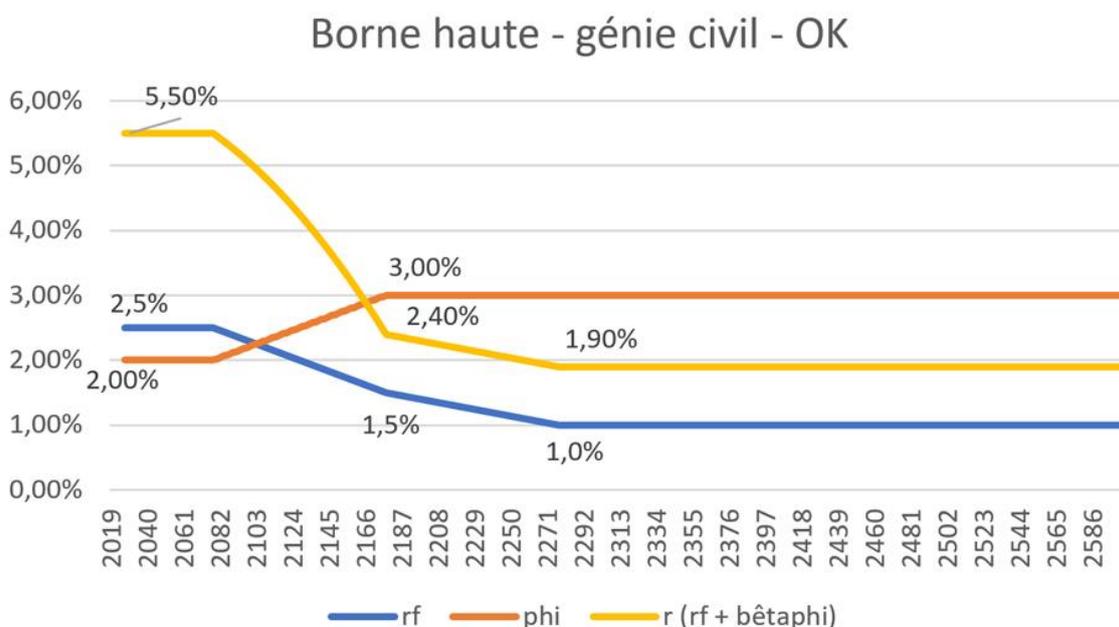
Tableau 3.3-2 Les taux d'actualisation en scénario OK

Composante du taux d'actualisation	Jusqu'en 2070	En 2170	À partir de 2270
Taux sans risque haut	2,5 %	1,5 %	1,0 %
Phi haut	2,0 %	3,0 %	3,0 %
Bêta haut - flux de génie civil	1,5	0,3	0,3
Bêta haut - flux de recherche et maintien des compétences	1,0	0,1	0,1
Taux d'actualisation haut - flux de génie civil	5,5 %²⁸	2,4 %	1,9 %
Taux d'actualisation haut - flux recherche et maintien des compétences	4,5 %	1,8 %	1,3 %
Taux sans risque intermédiaire	2,25 %	1,0 %	0,5 %
Phi intermédiaire	1,5 %	2,5 %	2,5 %

²⁸ Le taux d'actualisation total de 5,5 % est le résultat du taux sans risque (2,5 %), auquel on ajoute le produit du phi (2 %) par le bêta du génie civil (1,5 %). En d'autres termes, $5,5 = 2,5 + (2 \times 1,5)$.

Composante du taux d'actualisation	Jusqu'en 2070	En 2170	À partir de 2270
Bêta intermédiaire - flux de génie civil	0,8	0,2	0,2
Bêta intermédiaire - flux de recherche et maintien des compétences	0,5	0,05	0,05
Taux d'actualisation intermédiaire - flux de génie civil	3,45 %	1,5 %	1,0 %
Taux d'actualisation intermédiaire - flux de recherche et maintien des compétences	3,0 %	1,13 %	0,63 %
Taux sans risque bas	2,0 %	0,1 %	0,1 %
Phi bas	1,0 %	2,0 %	2,0 %
Bêta bas - flux de génie civil	0,1	0,1	0,1
Bêta bas - flux de recherche et maintien des compétences	0,0	0,0	0,0
Taux d'actualisation bas - flux de génie civil	2,1 %	0,3 %	0,3 %
Taux d'actualisation bas - flux de recherche et maintien des compétences	2,0 %	0,1 %	0,1 %

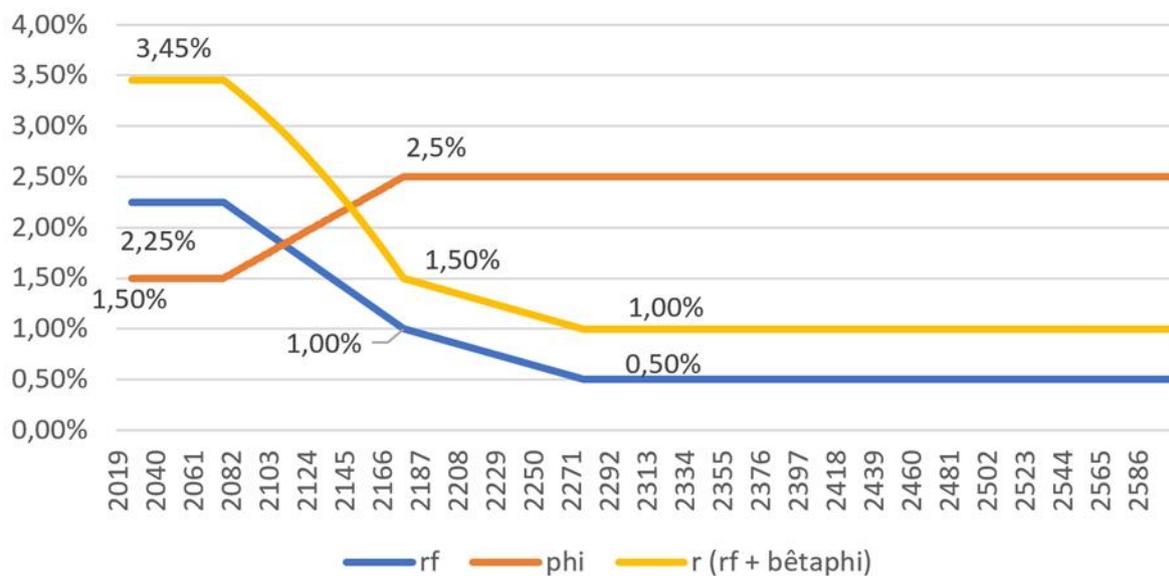
Les graphiques suivants représentent visuellement l'évolution des taux et de leurs composantes en scénario OK, bornes haute, basse et intermédiaire, pour les flux liés au génie civil et pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences.



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0009-A

Figure 3.3-2 Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK

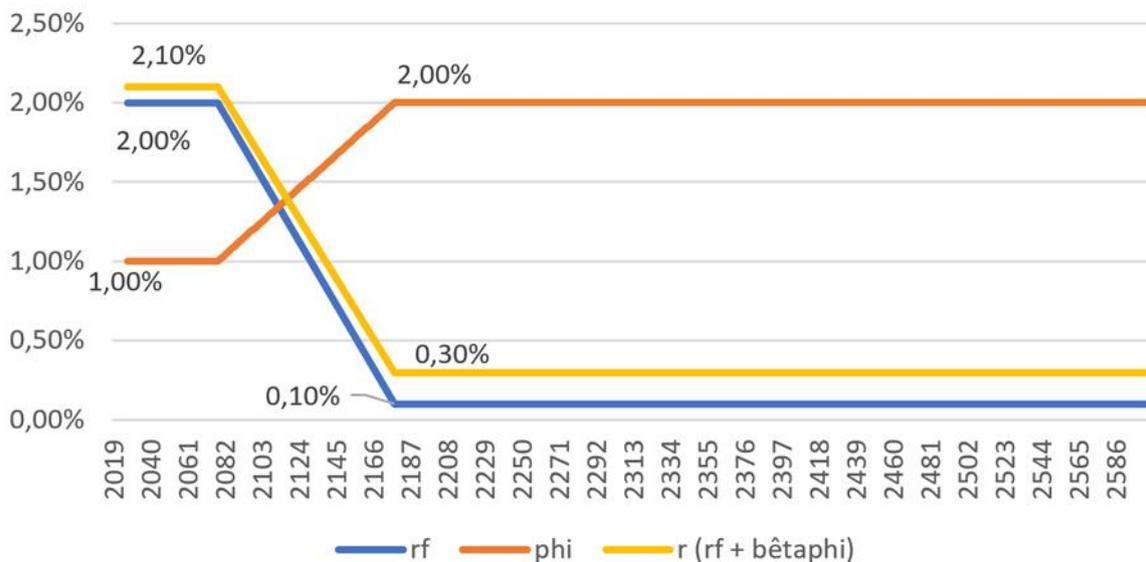
Borne intermédiaire - génie civil - OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0010-A

Figure 3.3-3 Borne intermédiaire des taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK

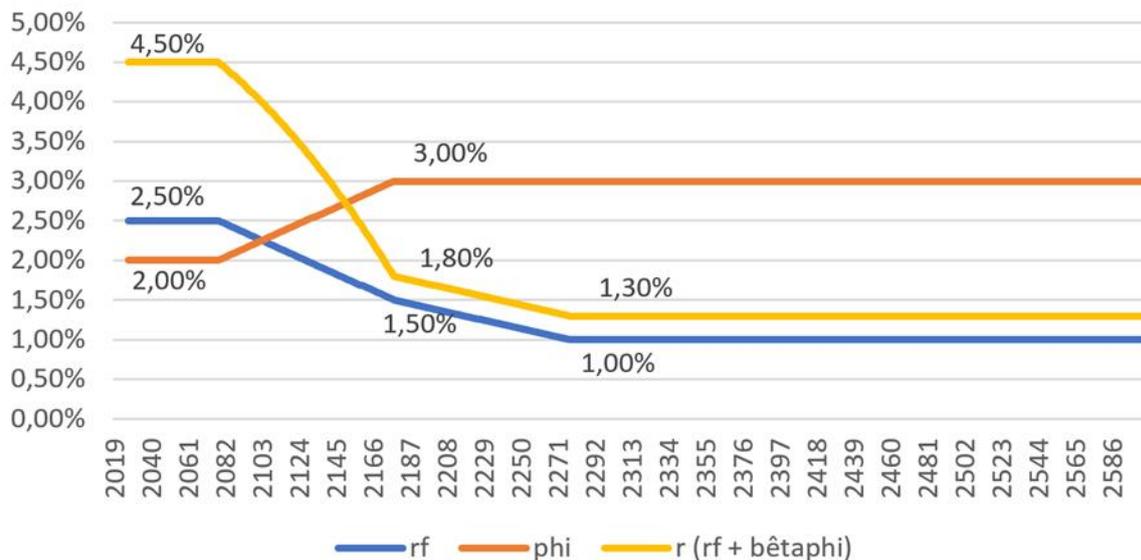
Borne basse - génie civil - OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0011-A

Figure 3.3-4 Borne basse des taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK

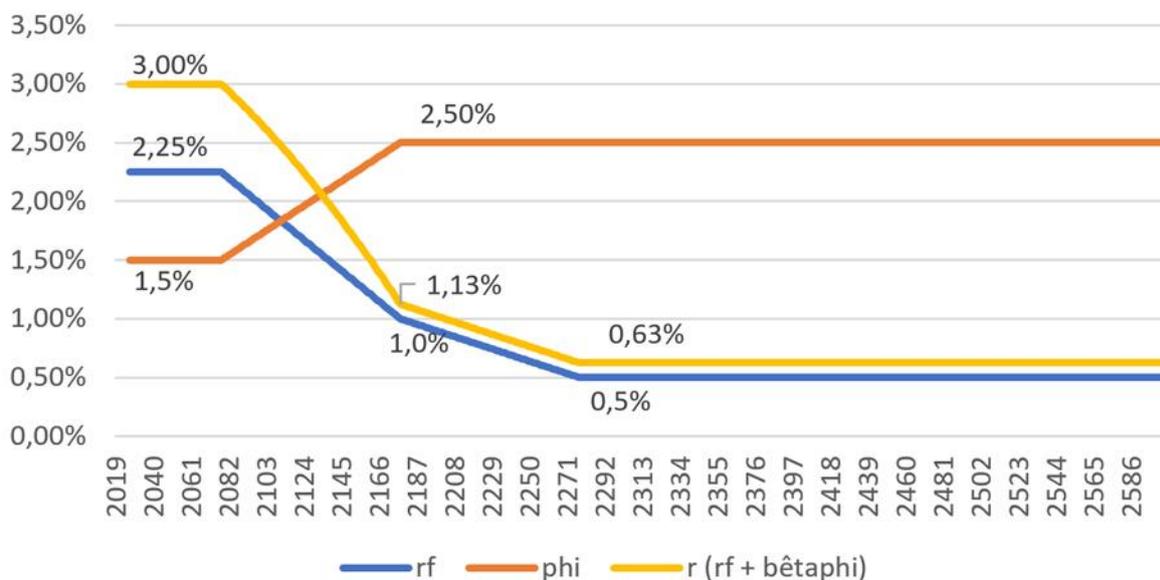
Borne haute - recherche - OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0012-A

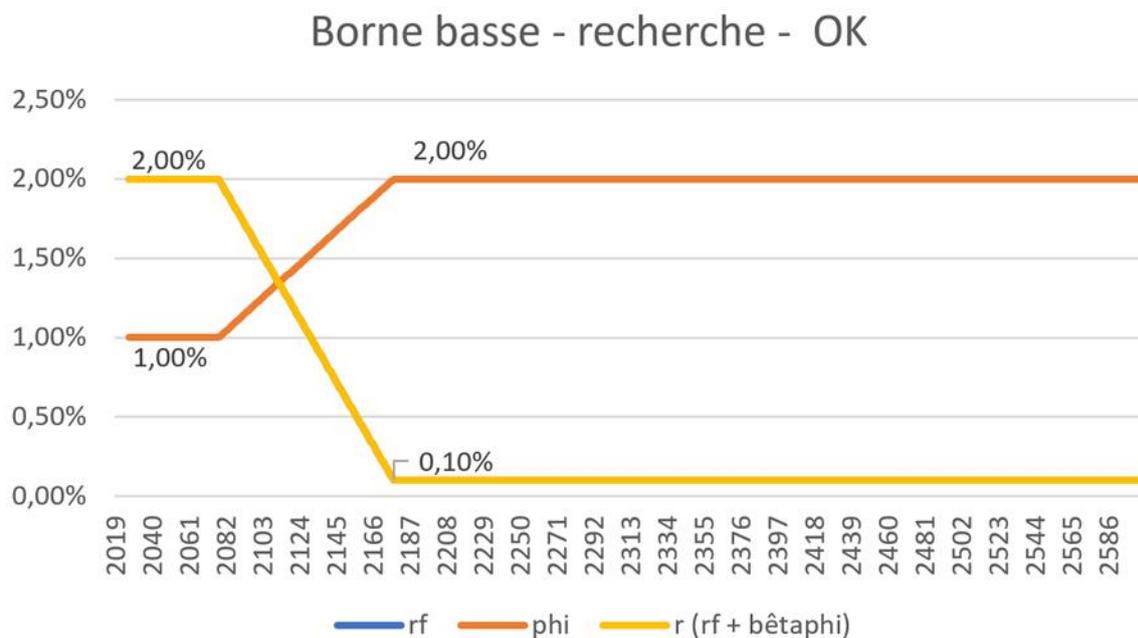
Figure 3.3-5 Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK

Borne intermédiaire - recherche - OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0013-A

Figure 3.3-6 Borne intermédiaire des taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0014-A

Figure 3.3-7 Borne basse des taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK

Le facteur d'actualisation correspond au facteur par lequel on multiplie le coût (ou bénéfice) non actualisé pour obtenir le coût (ou bénéfice) actualisé. Mathématiquement, le facteur d'actualisation est donné par la formule suivante pour l'année 2019 :

$$\text{Facteur d'actualisation}_{2019} = 1/(1 + r)^n$$

Où r est la valeur du taux d'actualisation et n est le nombre d'années après 2019.

Pour les années subséquentes, les taux n'étant pas stables, le facteur est obtenu en prenant l'inverse du produit des termes $(1+r)$ de l'ensemble des années précédentes et de l'année d'intérêt, par exemple pour 2021 :

$$\text{Facteur d'actualisation}_{2021} = \frac{1}{(1 + r_{2019}) * (1 + r_{2020}) * (1 + r_{2021})}$$

On observe qu'avec la borne basse, une somme dépensée en 2070 a une valeur actualisée équivalente à 34 % de sa valeur en 2019, tandis qu'avec la borne haute du taux d'actualisation, le poids du futur est encore plus faible : la valeur actualisée tombe à 6,2 % de la valeur en 2019.

3.3.2.2 Scénario KO

a. Le taux sans risque en 2019

Le scénario KO correspond, dans un premier temps, aux prévisions de croissance fournies par les « Shared socioeconomic pathways » pour le SSP3. Comme précisé dans le chapitre 3.2.2.2 du présent document, à partir de 2080, nous supposons une décroissance linéaire jusqu'à atteindre zéro en 2100 ; le taux de croissance est ensuite maintenu nul.

Sur la période 2019 à 2100, la croissance moyenne annuelle de ce scénario s'établit à 0,7 % ; sur la période 2019 à 2070, elle est de 0,89 %. La croissance projetée est donc bien inférieure à celle

utilisée pour la modélisation des taux d'actualisation projetés par le rapport Quinet (2013 (11)) et par Gollier (2016 (55)).

Ainsi, pour l'année 2019, nous proposons de retenir un taux sans risque inférieur au scénario OK, afin de tenir compte de l'incertitude inhérente à ce scénario (effet de précaution) ; par ailleurs, nous proposons de retenir une décroissance du taux plus précoce, afin de refléter la décroissance immédiate du taux de croissance dans ce scénario.

Nous proposons de retenir un taux sans risque en 2019, de 1,5 % pour la borne haute du scénario KO, de 1,25 % pour le taux sans risque intermédiaire et 1 % pour la borne basse.

b. Le taux sans risque entre 2019 et 2100

e. De manière similaire à l'approche des taux de croissance du scénario KO, nous proposons de faire décroître le taux sans risque du scénario KO, ici linéairement jusqu'en 2100. Le taux sans risque de 2019 ayant été défini ci-dessus, il convient donc de se pencher sur les valeurs que peut prendre le taux sans risque en 2100 dans le scénario KO : la seule valeur positive possible est le taux de préférence pure pour le présent (le taux de croissance étant supposé nul, avec une volatilité nulle). Deux valeurs de taux sans risques sont possibles :

- ✓ si nous considérons qu'il ne doit pas y avoir de préférence pour le présent, le taux sans risque est nul ou proche de zéro ;
- ✓ si nous supposons qu'il convient de prendre en compte une préférence pour le présent, et que nous suivons les recommandations du rapport Lebègue (2005 (54)), le taux sans risque est égal à 1.

Ainsi, en borne haute, nous retenons un taux sans risque en 2100 de 1 %, et en borne basse, de 0,1 %. Le taux sans risque intermédiaire est situé à 0,5 %.

c. Le taux sans risque au-delà de 2100

Au-delà de 2100, les taux sans risque sont stables.

Le tableau suivant résume les choix de taux sans risque, en bornes haute, intermédiaire et basse, pour le scénario KO, aux différentes périodes considérées.

Tableau 3.3-3 Taux sans risque, dans le scénario KO

Taux sans risque	En 2019	À partir de 2100 ²⁹
Taux sans risque haut	1,5 %	1,0 %
Taux sans risque intermédiaire	1,25 %	0,5 %
Taux sans risque bas	1,0 %	0,1 %

d. La prime de risque

Les β du scénario KO ont été définis dans le chapitre 3.2.3.2 du présent document.

S'agissant des φ , on estime que plus le risque portant sur la distribution des taux de croissance est élevé, plus φ sera élevé. Il semble légitime de penser que ce risque est supérieur dans une société KO que dans une société OK ; dès lors, φ devrait être supérieur en société KO qu'en société OK.

Il est toutefois hors du champ de cette étude d'estimer un φ précis par scénario ; toute distinction arbitraire introduirait dès lors une précision illusoire. Ainsi, nous notons qualitativement cette potentielle distinction entre *scenarii*, tout en conservant une prime de risque identique entre les *scenarii*.

²⁹ Le taux sans risque décroît linéairement entre 2019 et 2100, période à partir de laquelle il est considéré stable.

Dès lors, comme dans le scénario OK, nous mobilisons un $\varphi = 2$ en 2019, augmentant linéairement vers $\varphi = 3$ en 2100 pour la borne haute ; pour la borne basse nous retenons $\varphi = 1$ en 2019, augmentant linéairement vers $\varphi = 2$ en 2100. Pour le taux intermédiaire, les valeurs de $\varphi = 1,5$, augmentant linéairement vers $\varphi = 2,5$ à partir de 2100 sont mobilisées.

e. Résumé des taux d'actualisation retenus en scénario KO

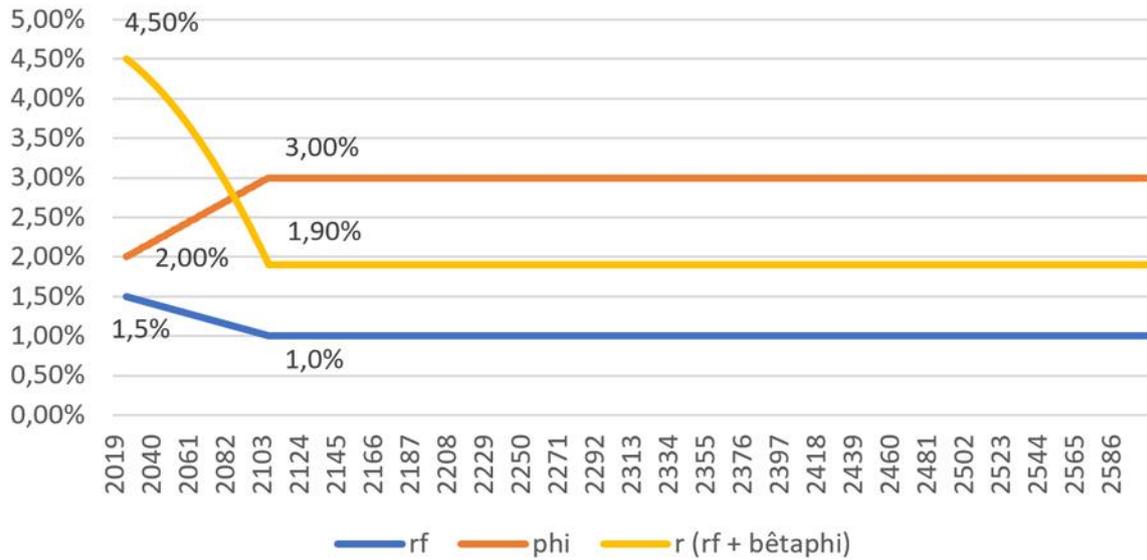
Les taux d'actualisation retenus pour le scénario KO sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3-4 Les taux d'actualisation du scénario KO

Composante du taux d'actualisation	En 2019	À partir de 2100
Taux sans risque haut	1,5 %	1,0 %
Phi haut	2,0 %	3,0 %
Bêta haut - flux de génie civil	1,5	0,3
Bêta haut - flux de recherche et maintien des compétences	1,0	0,1
Taux d'actualisation haut - flux de génie civil	4,5 %	1,9 %
Taux d'actualisation haut - flux recherche et maintien des compétences	3,5 %	1,3 %
Taux sans risque intermédiaire	1,25 %	0,5 %
Phi intermédiaire	1,5 %	2,5 %
Bêta intermédiaire - flux de génie civil	0,8	0,2
Bêta intermédiaire - flux de recherche et maintien des compétences	0,5	0,05
Taux d'actualisation intermédiaire - flux de génie civil	2,5 %	1,0 %
Taux d'actualisation intermédiaire - flux de recherche et maintien des compétences	2,0 %	0,63 %
Taux sans risque bas	1,0 %	0,1 %
Phi bas	1,0 %	2,0 %
Bêta bas - flux de génie civil	0,1	0,1
Bêta bas - flux de recherche et maintien des compétences	0,0	0,0
Taux d'actualisation bas - flux de génie civil	1,1 %	0,3 %
Taux d'actualisation bas - flux de recherche et maintien des compétences	1,0 %	0,1 %

Les graphiques suivants représentent visuellement l'évolution des taux d'actualisation du scénario KO, bornes haute, basse et intermédiaire, pour les flux liés au génie civil et pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences.

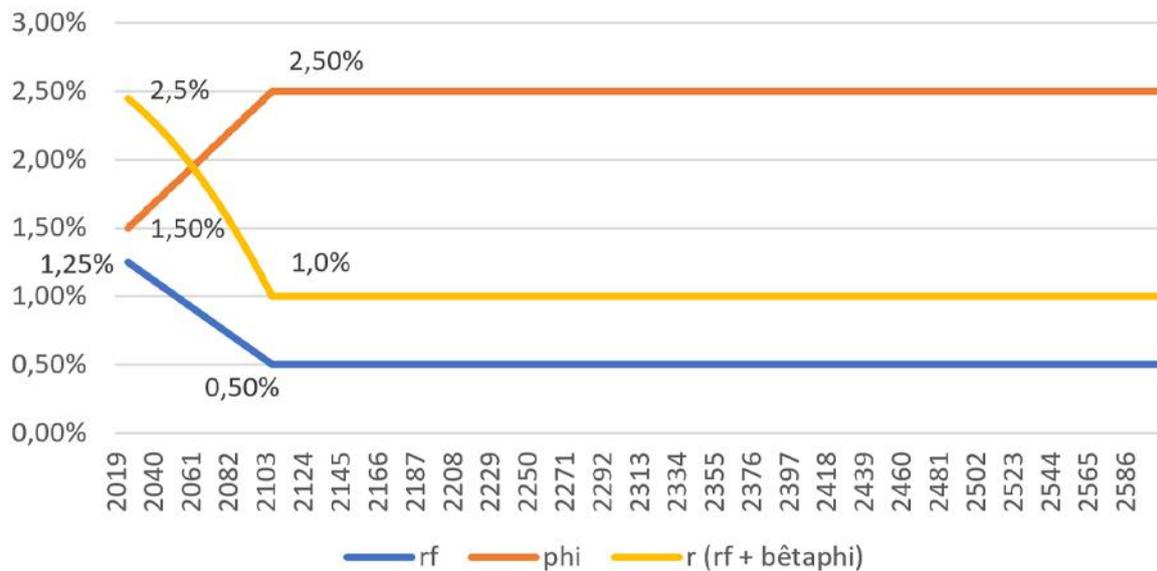
Borne haute - génie civil - KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0015-A

Figure 3.3-8 Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO

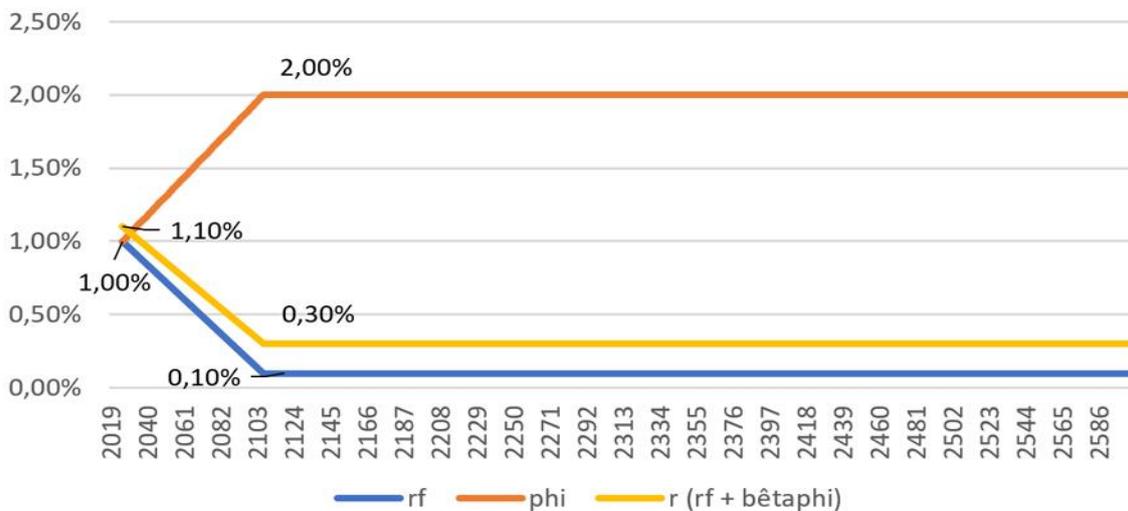
Borne intermédiaire - génie civil - KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0016-A

Figure 3.3-9 Borne intermédiaire du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO

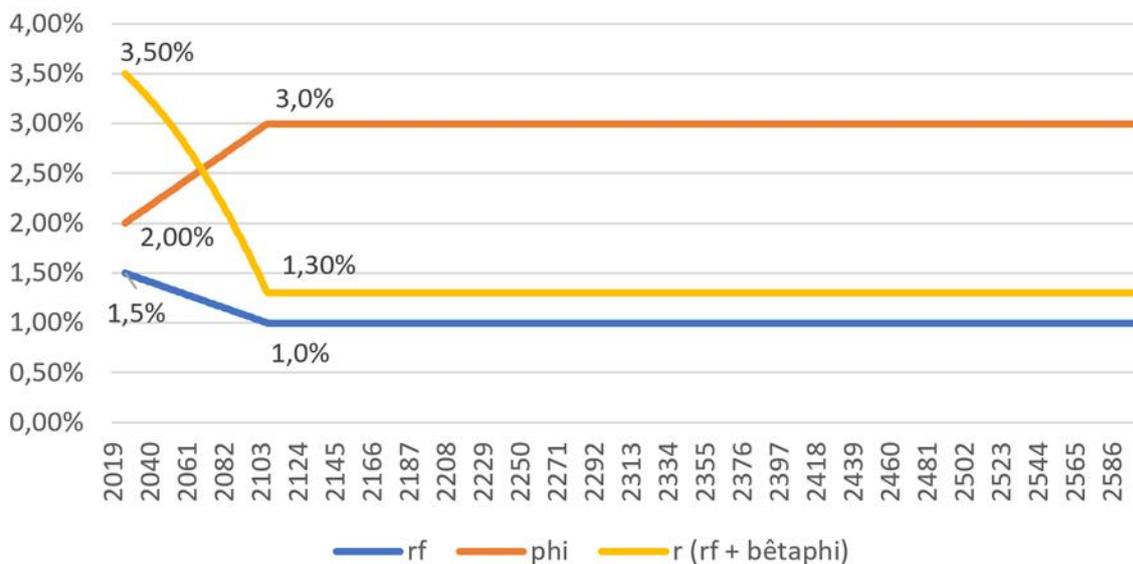
Borne basse - génie civil - KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0017-A

Figure 3.3-10 Borne basse du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO

Borne haute - recherche- KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0018-A

Figure 3.3-11 Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO

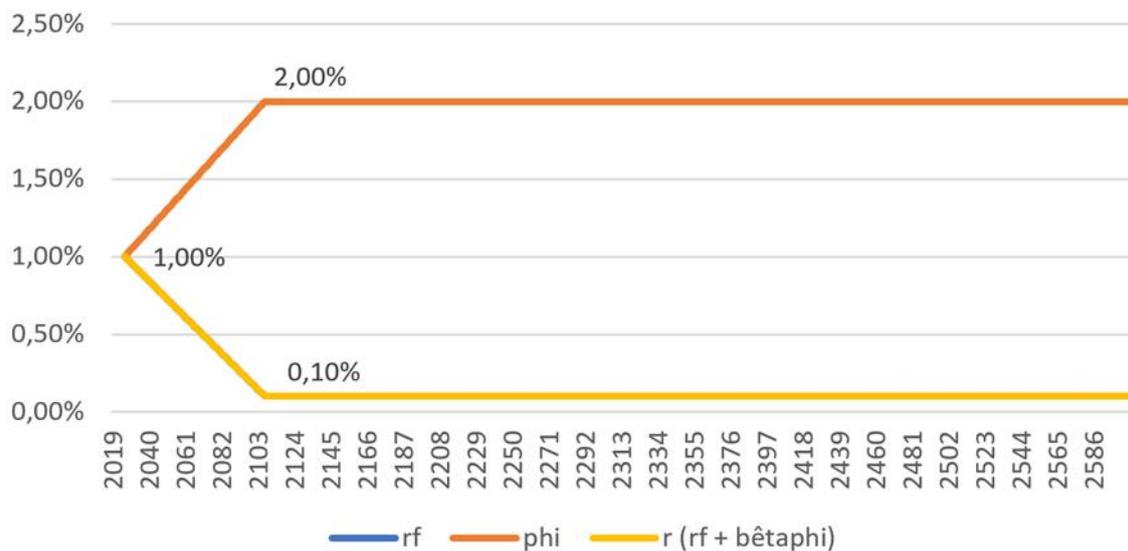
Borne intermédiaire - recherche - KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0019-A

Figure 3.3-12 Borne intermédiaire du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO

Borne basse - recherche - KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0020-A

Figure 3.3-13 Borne basse du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO

a) Tableau de synthèse des taux d'actualisation utilisés

Le tableau suivant synthétise les valeurs des taux d'actualisation utilisés dans l'évaluation socioéconomique pour les deux *scenarii*, pour chaque période, avec les bornes haute, basse et intermédiaire et selon les flux considérés.

Tableau 3.3-5 *Récapitulatif des taux d'actualisation utilisés dans l'évaluation socioéconomique*

Taux d'actualisation		Scénario OK			Scénario KO	
		Entre 2019 et 2070	En 2170	À partir de 2270	En 2019	À partir de 2100
Flux de génie civil	Taux d'actualisation haut	5,5 %	2,4 %	1,9 %	4,5 %	1,9 %
	Taux d'actualisation intermédiaire	3,45 %	1,50 %	1 %	2,5 %	1 %
	Taux d'actualisation bas	2,1 %	0,3 %	0,3 %	1,1 %	0,3 %
Flux de recherche et maintien des compétences	Taux d'actualisation haut	4,5 %	1,8 %	1,3 %	3,5 %	1,3 %
	Taux d'actualisation intermédiaire	3 %	1,13 %	0,63 %	2 %	0,63 %
	Taux d'actualisation bas	2 %	0,1 %	0,1 %	1 %	0,1 %

3.4 Arbres de décision, aléas et critère de choix

3.4.1 Arbre de décision

Comme ce sera présenté en détail dans le chapitre 4 du présent document, plusieurs options ont été modélisées pour que le décideur public puisse arbitrer, en fonction des coûts et avantages de chacune. Dans la plupart des options, le décideur public se trouve confronté à des choix de mise en œuvre du centre de stockage Cigéo plus ou moins décalée, de mise en place d'une technologie prospective ou de maintien d'un entreposage de longue durée renouvelé. La possibilité de mise en œuvre de ces choix dépend de la possibilité de maintien du site, de l'identification d'un nouveau site et de l'aboutissement de la recherche pour une technologie prospective.

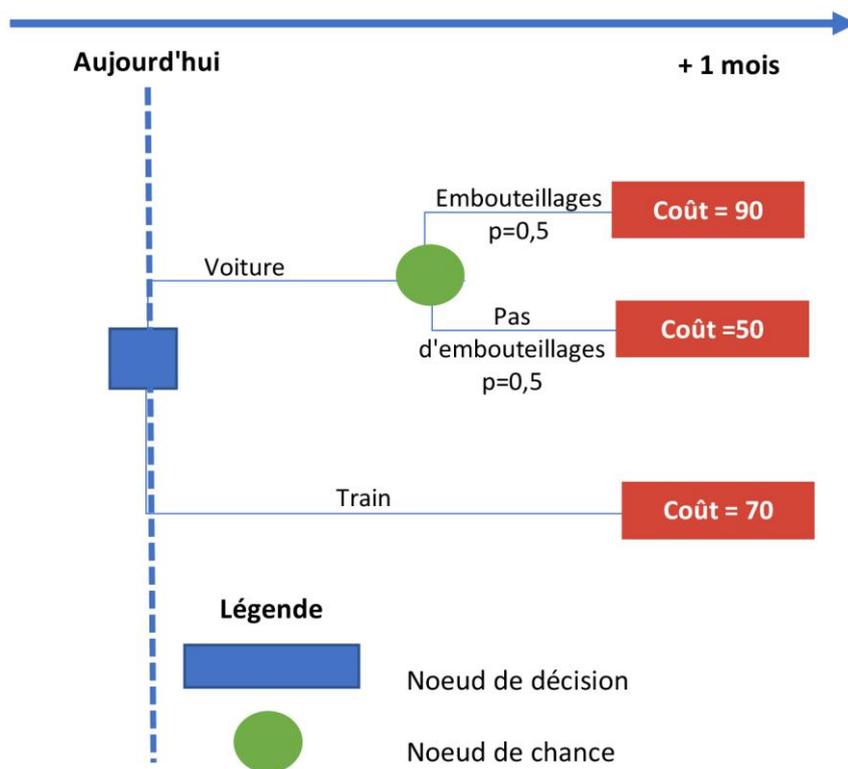
Ces choix possibles et leur probabilité d'occurrence sont représentés dans **des arbres de décision**. Les arbres de décision sont utilisés afin de choisir le meilleur plan d'action face à un problème complexe. Les branches d'un arbre de décision représentent des choix ou conséquences possibles.

Tout au long de ce chapitre, nous utilisons un exemple *ad hoc* pour expliquer les concepts économiques et mathématiques mobilisés : nous imaginons qu'un arbre de décision est utilisé afin de modéliser le choix optimal du mode de transport pour partir en vacances.

Supposons qu'une personne, que l'on nommera au hasard Estelle, se pose la question du mode de transport optimal pour partir en vacances dans 1 mois. Elle a le choix entre prendre le train et utiliser sa voiture. On suppose qu'Estelle ne peut pas réserver de billet de train avant deux semaines, mais qu'elle souhaite arrêter son choix dès que possible.

Si elle décide de partir en voiture, elle pense qu'elle dépensera 50 €. Avec une probabilité de 0,5, il y aura des embouteillages, et elle devra annuler sa réservation d'hôtel, annulation qui lui coûtera 30 €. Son coût total est alors de 80 €. Avec une probabilité de 0,5, elle n'aura pas d'embouteillages, et arrivera à l'heure. Son coût total est alors simplement égal au coût d'utilisation de la voiture (soit 50 €).

Si elle décide de voyager en train, elle imagine qu'elle dépensera 70 € ; on suppose qu'elle arrivera toujours à destination à l'heure.



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0021-A

Figure 3.4-1 Exemple - Nœud de décision déterministe

Afin de choisir le meilleur plan d'action, Estelle commencera par estimer l'**espérance** de chacune des branches. L'espérance correspond aux utilités possibles, multipliées par leur probabilité d'occurrence. Ainsi, l'espérance du coût la branche « voiture » est de $50 \cdot 0,5 + 80 \cdot 0,5$, soit 65 €. L'espérance de la branche « train » est simplement de 70 €.

Estelle réduit son coût, et maximise donc son utilité en choisissant de voyager en voiture ; le choix optimal est donc ici de voyager en voiture, pour un coût espéré de 65 €.

3.4.2 Introduction d'aléa

Les coûts et les probabilités estimés dans cette étude sont entourés de plages de risques. En effet, les coûts de grands investissements ayant tendance à être sous-estimés, et la durée de l'étude étant particulièrement longue, il serait optimiste de fournir une estimation déterministe (c'est-à-dire sans plage de risque), plutôt qu'une fourchette de valeurs possibles. C'est la raison pour laquelle on parle de risque sur les coûts et non d'incertitude : le risque est probabilisable, tandis que l'incertitude ne l'est pas.

Pour faire un parallèle avec l'exemple précédent, on peut supposer que :

- le coût du voyage en voiture est fixe ; Estelle est certaine que son voyage lui coûtera 50 € dans deux semaines, et que cette somme n'est soumise à aucun aléa. L'espérance de cette branche est donc toujours égale à 65 €, compte tenu de la probabilité de devoir annuler la nuit d'hôtel ;
- le coût du billet de train est, quant à lui, beaucoup moins certain : entre les offres de dernière minute et les hausses de prix des trains remplis, le sens de l'évolution du prix est totalement inconnu. En prenant en compte cet aléa, Estelle suppose que le prix de son billet de train sera, dans deux semaines, au minimum de 50 €, et, au maximum, de 90 €.

En affectant une plage de risque au coût du billet de train, ce coût devient une variable aléatoire. Il faut alors lui affecter une distribution : en d'autres termes, la probabilité que chacune des probabilités comprise dans cet intervalle se réalise. Une distribution triangulaire, par exemple, suppose qu'une valeur (par exemple, les 70 € supposés par Estelle avant la prise en compte des aléas) se réaliseront beaucoup plus fréquemment que les valeurs extrêmes (50 € et 90 €). Une distribution uniforme suppose qu'il n'y a pas plus de probabilité qu'une valeur survienne plus fréquemment qu'une autre. Il est alors tout aussi probable que le coût de son billet de train soit de 50 € que de 90 € que de n'importe quelle autre valeur dans cet intervalle.

Dans notre exemple, nous supposons que le coût du billet de train adopte une distribution uniforme.

3.4.3 Simulation Monte Carlo

En supposant que la probabilité n'est plus une variable déterministe, mais une variable aléatoire, il devient plus complexe de calculer l'espérance de chaque branche, et donc, la décision optimale de notre voyageuse. Si le coût du billet devient une variable aléatoire, l'espérance de la branche devient également une variable aléatoire.

Afin de calculer l'espérance de chaque branche en présence de variables aléatoires, il convient de s'appuyer sur des simulations Monte-Carlo. Ces simulations effectuent des « tirages » aléatoires répétés de chaque valeur possible de variable aléatoire, en fonction de sa distribution (en général, plus de 1 000 tirages sont nécessaires pour une estimation fine, en fonction du nombre de variables aléatoires).

Le coût du billet de train a été défini comme une variable aléatoire comprise entre 50 € et 90 €, et de distribution uniforme. Ainsi, une simulation Monte-Carlo « tirera » chaque valeur comprise entre 50 € et 90 € autant de fois. Chaque « tirage » correspond à un état du monde possible ; dans certains de ces états du monde, les trains seront vides et Estelle pourra profiter d'offres de dernière minute peu chères ; dans d'autres, les trains seront remplis, et Estelle paiera son billet au prix fort.

3.4.4 Critère de choix

Une fois l'ensemble des espérances et leurs plages de distribution connues *via* une simulation Monte-Carlo, Estelle doit les utiliser pour instruire sa décision d'acheter, ou non, un billet.

3.4.4.1 Choix de décision sans valeur d'option

Le cas le plus simple correspond à la situation décrite ci-dessus : on suppose qu'Estelle doit faire son choix aujourd'hui pour un achat dans deux semaines, et ne peut pas donc pas bénéficier d'un gain de connaissance. Son arbre de décision est identique à celui présenté au chapitre 3.4.1 du présent document, à une exception près : le coût du billet de train est devenu une variable aléatoire.

Avec la mise en place de variables aléatoires, Estelle choisira la branche dont l'espérance moyenne est la plus faible :

- la branche « voiture » ne dépend d'aucune variable aléatoire : son espérance de coût sera toujours de 65 € ;
- la branche « train » dépend de la variable aléatoire qu'est le coût de son billet de train. Son espérance moyenne correspond donc à la moyenne de la distribution de l'espérance de cette branche. Le coût de son billet de train est une variable aléatoire distribuée uniformément entre 50 € et 90 €, soit en moyenne de 70 €. Ainsi, l'espérance moyenne de la branche est tout simplement égal à 70 €.

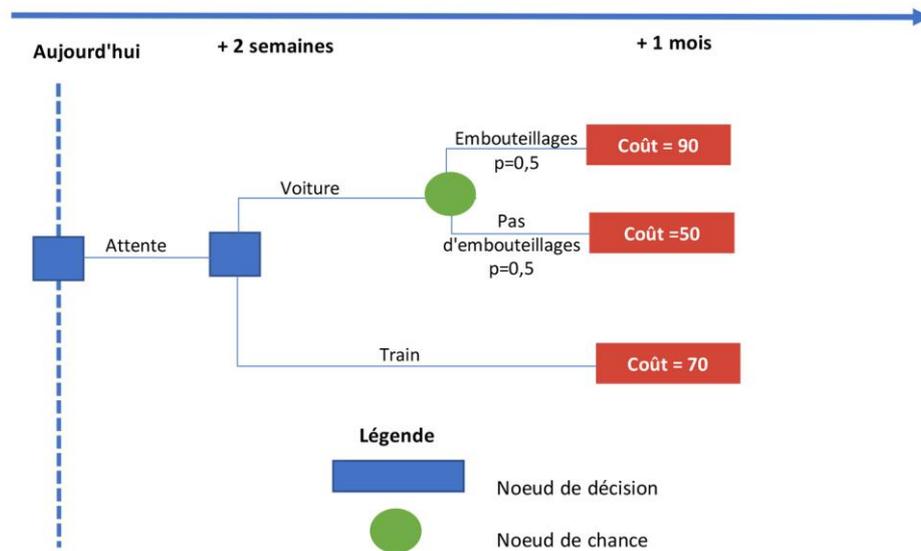
Estelle choisira donc de partir en voiture, pour un coût espéré de 65 €.

On note ici que la prise en compte de l'aléa ne modifie pas son choix. Cela n'est pas toujours le cas ; par exemple, Estelle pourrait penser que son billet de train aura plus de chances de lui coûter moins de 70 € que plus de 70 €. Dans ce cas, il se peut que la prise en compte des aléas inverse son choix de transport.

3.4.4.2 Choix de décision avec valeur d'option

Supposons maintenant qu'Estelle ne soit pas obligée d'arrêter son choix de transport dès aujourd'hui, et qu'elle puisse attendre le jour de son achat potentiel de billet de train, soit dans deux semaines, pour arrêter son choix. Ce faisant, Estelle profitera d'un gain d'information.

Son arbre de décision prendrait alors la forme suivante :



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0022-A

Figure 3.4-2 Exemple - Nœud de décision avec valeur d'option

Si nous utilisons la même méthodologie que ci-dessus, c'est-à-dire le choix de la branche dont l'espérance est la plus faible, le résultat est le même : l'espérance moyenne de la distribution de la branche « train » est de 70 €, soit plus que les 65 € certains de la branche « voiture ». Estelle choisit de partir en voiture.

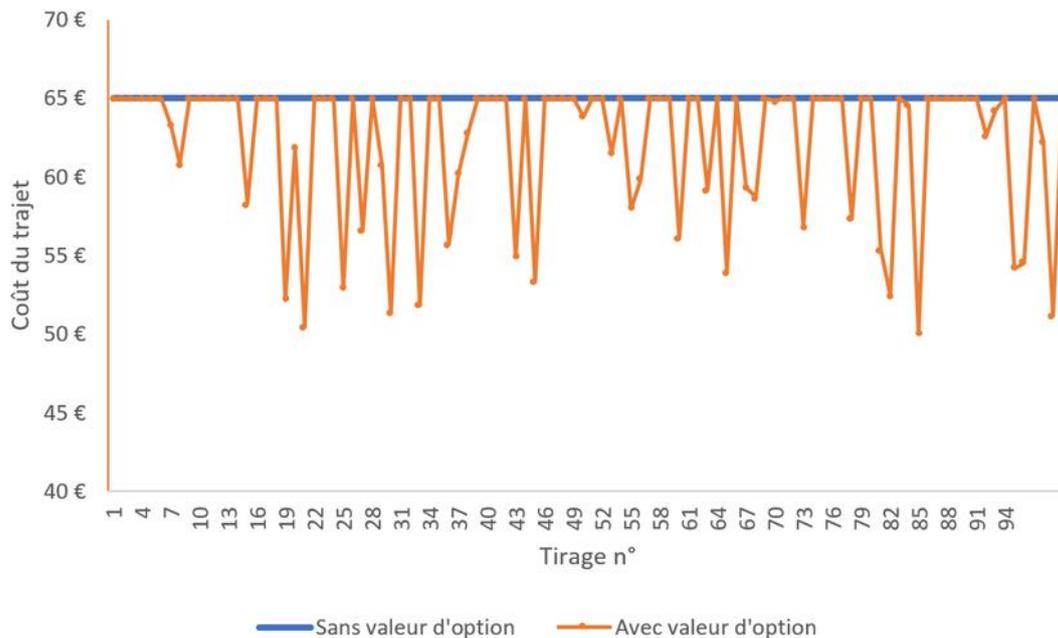
Cette méthodologie ne prend pas en compte les gains d'informations possibles. En décidant de son mode de transport le même jour que son achat potentiel de billet de train, Estelle connaîtra son coût exact.

Ainsi, si le billet de train coûte moins de 65 €, Estelle choisira de réserver son billet, car l'espérance de coût de la branche est inférieure à celle de la branche « voiture » (+65) ; si le billet de train coûte plus de 65 €, elle décidera de partir en voiture.

Afin de prendre en considération ce gain d'information dans le calcul, il convient d'estimer des **valeurs d'options**.

Chaque tirage de la simulation représente un « état du monde », auquel est associé un coût du billet de train. Ainsi, à chaque tirage, le choix d'Estelle sera différent. Le graphique ci-dessous illustre le choix d'Estelle à chaque tirage :

- sans valeur d'option (ligne bleue), c'est-à-dire si elle prend sa décision de mode de transport aujourd'hui, sans possibilité d'en changer, elle prend la voiture, pour un coût espéré constant de 65 € ;
- avec valeur d'option (courbe rouge), elle prend le train lorsque celui-ci est moins cher que le voiture (la courbe descend alors en dessous de la ligne représentant son choix à chaque tirage sans valeur d'option) ; lorsque celui-ci est plus cher, elle prend la voiture (la courbe rouge se confond alors avec la ligne bleue).



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0023-A

Figure 3.4-3 Exemple - Valeur des tirages avec et sans valeur d'option

L'espérance de l'arbre avec la valeur d'option est égale à la moyenne des points représentés par la courbe rouge sur les 100 tirages effectués ; il s'agit donc d'une moyenne des minimums à chaque tirage. Ainsi, cette espérance tient compte du choix optimal pour l'ensemble des états du monde possible. Contrairement à la décision sans valeur d'option, Estelle n'est pas cantonnée à un choix dont elle ne peut se départir, même si les conditions l'entourant sont modifiées.

Cette espérance avec valeur d'option est de 62 ; dès lors, en moyenne, Estelle gagne 3 euros à retarder sa décision, pour profiter de gains d'information sur le prix du billet de train : elle choisira le mode de transport le moins cher au moment où elle effectuera son choix.

Dans le chapitre qui suit (cf. chapitre 4), les options vont être définies. Puis, dans le chapitre 5 les coûts des options seront estimés et les résultats seront exposés sans valeur d'options. Ce n'est que dans le chapitre 7, mettant en évidence les comparaisons des coûts et des bénéfices des différentes options que le raisonnement avec valeur d'options sera appliqué pour tenir compte des gains informationnels possibles sur la période 2019 - 2070. Nous verrons que les résultats sans et avec valeurs d'options ne varient que très marginalement.

4

Options de projet comparées

4.1	Les modalités étudiées de gestion des déchets radioactifs	91
4.2	Les options retenues et non retenues en bref	95
4.3	Option de projet 1 : le centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra	96
4.4	Option 2 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA	98
4.5	Option 3 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL	100
4.6	Option 4 : efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL sans investissement dans le centre de stockage Cigéo	104

Comme le rappelle le chapitre 1 relatif à la méthodologie, l'évaluation socioéconomique est une démarche différentielle entre plusieurs options : on n'évalue pas les coûts et les bénéfices de l'option de projet Cigéo dans l'absolu, mais par rapport à d'autres options. Ce chapitre 4 est donc dédié à la description des différentes options envisagées et à leur calendrier.

Par la suite dans le chapitre 5, les coûts de chacune de ces options seront détaillés³⁰, et dans le chapitre 6, nous estimerons les bénéfices de ces options, ou plus précisément la façon dont chacune des options permet de limiter la probabilité et les conséquences associées à la survenue d'un éventuel accident. Le chapitre 7 permettra de mettre en regard les coûts et bénéfices de chaque option, dans les *scenarii* contrastés identifiés au sein du chapitre 3 du présent document.

La définition des options de projet constitue une étape méthodologique centrale dans l'évaluation socioéconomique, ce qui implique une grande attention. Elle nécessite en premier lieu de préciser le périmètre de l'investissement à évaluer et en second lieu de déterminer d'autres options de projet que l'évaluation socioéconomique requiert conventionnellement de définir.

S'agissant du périmètre, il convient de rappeler que l'évaluation porte sur l'investissement dans un projet permettant de gérer les déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue, répertoriés dans l'inventaire de référence. Il ne s'agit en aucun cas d'effectuer une évaluation de la politique énergétique française, ni des perspectives du nucléaire en son sein. En effet, qu'il s'agisse du centre de stockage Cigéo ou de toute autre option décrite dans ce chapitre, aucune ne spéculer sur l'avenir du nucléaire français, et toutes visent à répondre aux nécessités de gestion à long terme des déchets produits depuis les années 1950 et qui sont actuellement entreposés.

S'agissant du choix des « autres options de projet », plusieurs définitions peuvent être envisagées.

La définition la plus restrictive consiste à n'envisager que des options desquelles résultent des solutions de gestion des déchets susceptibles de rendre le même service que le centre de stockage Cigéo, c'est-à-dire ne nécessitant plus, après fermeture, de surveillance active (et donc indépendant de l'état de la société). Or en l'état actuel des connaissances, aucune technologie de substitution au stockage géologique profond ne permet de répondre aux exigences de sûreté françaises, contrairement au centre de stockage Cigéo. De la même façon, à l'international, les autres technologies ayant fait l'objet d'études approfondies ne disposent pas, de fait, du même niveau de maturité que le stockage géologique profond sur le plan industriel. Afin de répondre aux exigences de la méthode d'évaluation socioéconomique, des options prospectives sont tout de même considérées, et leur quantification inclut un temps long de recherche et développement (50 ans), dont le succès n'est pas garanti. L'évaluation socioéconomique permet toutefois de prendre en compte une telle incertitude.

Une définition plus large, conforme aux orientations du rapport Quinet (2013 (11), cf. page 51), concerne l'option de référence qui « *devrait être la situation optimisée la plus probable en l'absence de la réalisation du projet, à l'horizon considéré. Elle diffère donc d'un choix systématique d'intervention au fil de l'eau ou d'un choix systématique de maintien de la qualité de service. Elle ne comporte pas le projet étudié.* » L'entreposage de longue durée renouvelé des déchets radioactifs correspond bien à cette définition : le maintien d'un tel dispositif correspondrait le plus vraisemblablement à la solution retenue (au fil de l'eau) en l'absence de décision d'investir dans le stockage définitif et pérenne. Notons que cette solution nécessite une surveillance active et permanente, alors que le centre de stockage Cigéo permet la mise en sécurité définitive des déchets par un stockage passif, sans action de surveillance (humaine) après fermeture. Ces deux solutions (le stockage en couche géologique profonde et l'entreposage) ne permettent donc pas de rendre le même service à la société du futur. En outre, la sensibilité de ces solutions aux risques d'accident diffère (voir chapitre 6). Comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre, l'entreposage de longue durée renouvelé est la résultante d'une des branches de l'option 4.

Avant de décrire une à une les options, le chapitre 4.1 du présent document, retrace toutes les technologies alternatives ayant été considérées avant de retenir le stockage en couche géologique profonde, leur historique et leur maturité.

³⁰ Les estimations de coûts de cette évaluation socioéconomique ne sauraient se substituer aux mises à jour réglementaires du coût de Cigéo, dont la prochaine est prévue lors du processus d'autorisation de création de Cigéo (61).

4.1 Les modalités étudiées de gestion des déchets radioactifs

Ainsi que cela a été décrit dans le chapitre 2, la France a conduit, dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dite loi « Bataille » (22), des recherches visant à définir la meilleure solution de gestion possible pour les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Plusieurs alternatives ont été investiguées :

- la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue ;
- le stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes ;
- les procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface.

Après 15 années de travaux de recherche, le stockage réversible géologique profond s'est peu à peu imposé comme solution de référence. Bien qu'un large consensus des experts internationaux et des institutions techniques en charge des déchets radioactifs soit en faveur du stockage géologique profond (cf. chapitre 2.5 du présent document), cette solution continue de faire débat.

Cette évaluation socioéconomique ne constitue en rien une étude technique de différentes solutions, en revanche son but est d'objectiver les coûts et bénéfices des options, sur la base des données techniques partagées.

Plusieurs autres pistes concernant la gestion des déchets radioactifs faisant l'objet de travaux de recherche ont été inventoriées par l'IRSN (2019 (38)). Parmi ces pistes, on relève en particulier :

- la séparation-transmutation ;
- l'entreposage ;
- le stockage de déchets solides et conditionnés en forages profonds.

Si le rapport de l'IRSN identifie parmi les alternatives étudiées historiquement le stockage en fond marin, l'envoi des déchets radioactifs dans l'espace ou encore l'immobilisation de déchets dans la glace, celles-ci n'ont pas été retenues dans le cadre de cette évaluation. En effet, il convenait, pour l'évaluation, de disposer d'un socle minimum et documenté de données économiques pour en modéliser les conséquences. Par ailleurs, l'étude de ces pistes est aujourd'hui abandonnée à l'international et en France également.

Les chapitres 4.1.1, 4.1.2 et 4.1.3 ci-après présentent les trois pistes inventoriées par l'IRSN et discutent de leur pertinence en tant que technologie prospective pouvant figurer comme option alternative au stockage géologique profond dans cette évaluation socioéconomique.

4.1.1 La séparation/transmutation

L'étape préliminaire à la transmutation des actinides mineurs consiste à les séparer des combustibles qui les contiennent. Différents procédés de séparation existent. La transmutation vise à transformer des radionucléides dont la période radioactive est très longue (jusqu'à plusieurs centaines milliers d'années) en éléments stables ou à vie plus courte. La transmutation consiste en l'absorption d'un neutron par le noyau d'un radionucléide, ce qui conduit à en modifier les caractéristiques radioactives ou à provoquer une réaction de fission et donc à réduire la dangerosité des déchets.

Les experts s'entendent sur le fait que si un cycle électronucléaire basé sur des réacteurs à neutrons rapides permettrait théoriquement une réduction de la radiotoxicité des déchets issus du traitement des combustibles usés et de la durée de cette radiotoxicité, un tel cycle conduirait *in fine* à la production de déchets de haute activité pour lesquels la seule solution de gestion est le stockage géologique profond. Ainsi, le CEA précise « *La transmutation ne supprime pas le besoin d'un stockage géologique qui représente la solution définitive pour gérer de manière durable les déchets radioactifs ultimes de haute*

et moyenne activité à vie longue dont il est impossible d'envisager la suppression totale. La transmutation doit ainsi être perçue comme une piste d'optimisation de la gestion de ces déchets » (2012 (62)).

L'IRSN, dans le cadre du débat public sur le centre de stockage Cigéo en 2013 s'exprimait en ces termes : « L'IRSN considère que la séparation/transmutation ne constitue pas une alternative au stockage géologique. En dépit de l'avancée des recherches qui se poursuivent aujourd'hui, il est vraisemblable que ces opérations ne seront pas réalisables à l'échelle industrielle dans un proche avenir ni applicables aux déchets déjà produits » (63).

Dans le Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2019 (3), l'ASN « considère que les gains espérés de la transmutation des actinides mineurs en termes de sûreté, de radioprotection et de gestion des déchets n'apparaissent pas déterminants, au vu notamment des contraintes induites sur les installations du cycle du combustible, les réacteurs et les transports, qui devraient mettre en œuvre des matières fortement radioactives à toutes les étapes du cycle du combustible. L'ASN considère également que ces gains ne supprimeraient pas le besoin d'un stockage profond, et ne pourraient apporter une réduction tangible de l'emprise d'un futur stockage que dans l'hypothèse d'une exploitation au moins séculaire d'un parc de réacteurs à neutrons rapides suffisamment important pour assurer la cohérence d'ensemble du cycle. »

Les efforts de recherche sur les technologies de séparation poussée des radionucléides présents dans le combustible usé et les réacteurs de génération 4 permettant la transmutation des actinides (isotopes de l'américium, du neptunium et du curium en particulier) favorisent le maintien d'une expertise et d'une compétence nécessaires à la filière électronucléaire et utiles pour penser l'optimisation globale du cycle. Ces efforts doivent être maintenus. Pour autant, les acteurs de la filière en France ou en Russie, pays actuellement en pointe sur les réacteurs à neutrons rapides et le déploiement d'un cycle nucléaire fermé, s'entendent tous sur le fait que dans tout scénario, des déchets ultimes de type HA sont produits et nécessitent une solution de mise en sécurité définitive. Le stockage géologique est présenté par tous comme un maillon nécessaire et intégré à la stratégie du cycle.

Dès lors, dans la mesure où la séparation transmutation permet d'optimiser, mais pas de supprimer les déchets radioactifs et dans la mesure où cette technologie nécessiterait tout de même *in fine* de mettre en œuvre une solution de mise en sécurité définitive comme le stockage en couche géologique profonde, la séparation transmutation n'est pas étudiée, dans cette évaluation socioéconomique, comme option alternative au centre de stockage Cigéo.

4.1.2 L'entreposage de longue durée

Au sujet de l'entreposage de longue durée, l'IRSN précisait, toujours dans le cadre du débat public de 2013 sur le centre de stockage Cigéo : « Le choix d'une solution d'entreposage de longue durée des déchets HA et MA-VL engagerait inéluctablement les générations futures à réaliser ces opérations lourdes et potentiellement dangereuses, impliquant une exposition significative des travailleurs qui en auraient la charge. De plus, en cas d'abandon, l'entreposage générerait à terme des conséquences inacceptables pour le public et l'environnement. L'IRSN estime en conséquence qu'il n'est pas approprié d'imposer sciemment aux générations futures une telle charge de contrôle et de maîtrise des risques, dès lors qu'une solution pérenne peut être mise en œuvre à une échéance rapprochée. »

L'entreposage ne constitue donc pas une solution de gestion passive des déchets radioactifs, dans le sens où cette solution nécessite des moyens humains et financiers de surveillance, de reprise des colis, de renouvellement des entrepôts et de maintien des sites d'entreposage. Par ailleurs, situés en surface, les sites d'entreposage sont plus exposés à divers risques sur le long terme (cf. chapitre 6 du présent document).

Comme nous le verrons dans le chapitre 4.6 du présent document, certaines options de projet définies dans cette évaluation socioéconomique peuvent conduire à de l'entreposage de longue durée renouvelé (parce que les efforts de R&D ne portent pas leurs fruits et parce qu'il existe un risque de perdre le site actuel de Meuse/Haute-Marne pour l'implantation du centre de stockage Cigéo), mais l'entreposage de

longue durée n'est pas la finalité poursuivie dans l'option en question³¹. En effet, l'entreposage éternel n'apparaît pour personne comme une solution souhaitable, comme rappelé par l'IRSN et résumé dans les paragraphes ci-dessus au titre d'une plus forte exposition aux risques et une charge financière pour les générations futures.

4.1.3 Le forage profond

L'IRSN, dans son panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue (38), consacre un chapitre au forage profond et aborde plus précisément le stockage de déchets solides et conditionnés en forage, tout en soulignant que cette option n'a pas fait l'objet de recherche en France. Dans ce document, on relève ainsi les éléments suivants :

« Le premier concept de stockage de déchets solides en forages a été élaboré par la National Academy of Sciences des États-Unis en 1957. Les recherches sur cette option ont été abandonnées dans les années 1970 au profit de celles sur les concepts de stockage en mines ou installations souterraines. Les importants progrès technologiques intervenus au cours des trente dernières années ont récemment conduit certains pays à s'intéresser à nouveau à cette option. Aux États-Unis, un concept de référence a été proposé par Sandia National Laboratories à la demande du Department of Energy (DOE). Celui-ci consiste à placer 400 conteneurs de déchets au fond d'un forage profond d'environ 5 000 mètres.

Certains pays nucléarisés maintiennent une veille sur le sujet et d'autres considèrent le stockage en forage comme une option possible, au même titre qu'une installation de stockage géologique (par exemple la Belgique). Toutefois, seuls les États-Unis poursuivent des études poussées.

Un rapport publié en octobre 2013 par Sandia National Laboratories (64) indique que les évaluations préliminaires de stockage en forages profonds montrent de bonnes caractéristiques de confinement des déchets, et que le concept pourrait constituer, pour certains déchets, une solution de gestion définitive plus rapide à mettre en œuvre qu'un stockage géologique dans une installation souterraine. Les études menées plus particulièrement sur le stockage de combustibles usés civils conduisent à estimer à environ 800 le nombre de forages nécessaires. Ces études ont trouvé un écho particulier au Royaume-Uni et en Allemagne.

En janvier 2016, la compagnie Battelle a été chargée par le DOE de réaliser un forage d'essai de 4 880 mètres dans un socle cristallin du Dakota du Nord pour le stockage de sources de césium et de strontium actuellement entreposées sur le site de Hanford, ainsi qu'éventuellement des calcinats de haute activité et des sels provenant du traitement électrométallurgique des combustibles au sodium. Le site identifié dans le Dakota du Nord ayant été abandonné à la suite de mouvements de protestation, le DOE et Battelle ont envisagé successivement plusieurs autres implantations pour ce forage d'essai (Dakota du Sud, Nouveau-Mexique, Texas, etc.) mais ont dû les abandonner tour à tour en raison d'oppositions locales. Le DOE a annoncé l'arrêt de son projet de forage d'essai le 23 mai 2017.

En termes de recherches, les besoins de connaissance nécessaires au développement de ce type de stockage en forages de déchets solides recoupent assez largement ceux explorés dans le cadre des projets de stockage géologique dans une installation souterraine. Quelques spécificités ressortent toutefois des réflexions passées ou en cours. Elles concernent plus particulièrement les techniques de manutention des colis lors de la mise en forage mais aussi les méthodes de scellements qui, bien qu'elles soient également requises pour les installations souterraines associées au stockage géologique, font appel à des techniques

³¹ Pour des raisons de cohérence mathématique, une variante de l'option 4, modélisant dès 2019, le choix d'un entreposage de longue durée renouvelé (sans sécuriser le site actuel de Meuse/Haute-Marne, ni investir dans de la R&D pour trouver une solution alternative), a été étudiée. Cette variante est à l'évidence contraire à l'esprit de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs puisqu'elle laisse délibérément aux générations futures la tâche de gérer ces déchets, mais elle permet de mener le raisonnement logique jusqu'au bout, notamment pour le calcul d'un bénéfice assurantiel pivot de l'option de projet 1 (centre de stockage Cigéo).

spécifiques dans le cas d'un stockage en forages, notamment en termes de manutention et de scellement ».

Le stockage en forage profond (deep borehole) apparaît potentiellement comme une alternative technique au stockage géologique profond qui fournirait, en l'absence d'exigence de réversibilité et de récupérabilité des colis, un service approchant pour la société en terme de mise en sécurité définitive post fermeture. Cela étant, le développement d'un tel concept dans le contexte français nécessiterait d'importants travaux de recherche (typiquement, les caractéristiques du site de Meuse/Haute-Marne ne sont pas évaluées pour ce concept et *a priori* ne conviendraient pas pour une technologie de forage profond). Ces travaux de recherche ne sont pas envisagés à ce stade par la loi.

En complément du rapport de l'IRSN, la thèse d'Allen Bates (2015 (65)) soutenue au MIT et intitulée « Optimization of deep boreholes for disposal of high-level nuclear waste » comporte des éléments utiles à l'analyse du coût de la mise en place industrielle de cette solution de gestion.

Ces éléments ont conduit à considérer, dans le cadre de cette évaluation, le stockage en forage profond comme technologie prospective de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs HA, qui pourrait être mise en place en alternative au centre de stockage Cigéo, après des efforts de R&D. Si les déchets HA disposent d'une géométrie compatible avec une mise en forage profond, certains déchets MA-VL, emprisonnés dans des colis de ciment cubiques, ou sous d'autres formes imposantes, ne sont pas compatibles en l'état en géométrie avec cette technologie. Pour cette raison, dans les options dans lesquelles une technologie prospective alternative est recherchée pour les MA-VL, l'évaluation socioéconomique prévoit une densification préalable à la mise en forage.

Il sera retenu que les choix de mise en forage pour les déchets HA et de densification puis mise en forage pour les déchets MA-VL comme technologies prospectives alternatives au stockage en couche géologique profonde sont de nature conventionnelle et restreints au seul cadre de cette évaluation socioéconomique. Cela n'indique en rien que la voie est actuellement ouverte pour mettre en place cette technologie prospective en France. Il s'agit du jeu d'hypothèses que la démarche d'évaluation socioéconomique impose de réaliser.

À présent, les chapitres 4.3 à 4.6 décrivent les différentes options de projet pour lesquelles des coûts et des bénéfices seront estimés (cf. chapitres 5 et 6 du présent document), et qui seront comparées entre elles.

4.2 Les options retenues et non retenues en bref

L'évaluation socioéconomique requiert de modéliser une option de projet et un ou plusieurs contrefactuels, qui sont des options alternatives auxquelles est comparée l'option de projet. Les contrefactuels correspondent à ce qu'il se passerait le plus vraisemblablement si la décision de réaliser le projet (option de projet) n'était pas prise.

L'option consistant à délibérément ne rien faire pour la gestion des déchets radioactifs (c'est-à-dire ni stockage en couche géologique profonde, ni recherche et développement en vue de mettre en œuvre une technologie prospective, mais laisser sans limite de temps les déchets radioactifs en entreposage) a été écartée en tant que contrefactuel. En effet, autant il a été envisagé que des efforts de R&D pour tenter de trouver une technologie prospective de gestion définitive n'aboutissent pas, et que cette situation conduise en 2070 à de l'entreposage de longue durée renouvelé, autant il n'est pas apparu crédible qu'en 2019, dans une société qui se préoccupe de ses déchets et de la sécurité des générations futures, la décision soit prise de maintenir des déchets radioactifs en entreposage *sine die*³².

Pour cette raison, les options de références modélisées dans cette évaluation postulent toutes que le décideur public a pour ambition finale de mettre en place une technologie de mise en sécurité définitive.

Pour fixer les idées, et comme vu dans le chapitre 4.1 du présent document, la technologie prospective de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs HA la plus crédible consistera dans cette évaluation socioéconomique en une mise en forage profond. La technologie prospective de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs MA-VL la plus crédible consistera quant à elle en une densification, suivie d'une mise en forage profond³³. Des efforts conséquents de R&D seraient nécessaires pour démontrer que ces technologies prospectives sont capables de confiner la radioactivité de l'ensemble des déchets HA et MA-VL du parc français à un niveau acceptable sur une très grande échelle de temps. De telles recherches visant à rendre les technologies de densification et de mise en forage compatibles avec le niveau de sûreté exigé requièrent de s'abstraire du principe de mutualisation des déchets HA et MA-VL gérés *via* une même technologie. En effet, les options présentées ci-après ouvrent la possibilité, après des travaux de R&D, que ces deux familles de déchets soient gérées *via* des technologies différentes, ce qui diffère de l'objectif initial de gestion mutualisée de ces déchets dans le centre de stockage Cigéo.

En résumé, les options considérées dans cette évaluation socioéconomique sont :

- **L'option de projet 1** désigne une configuration de réalisation du centre de stockage Cigéo, tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi, après avis favorable de l'ASN ;
- **L'option 2** désigne une configuration où, après réalisation des premiers investissements du centre de stockage Cigéo, seuls les déchets MA-VL y seraient stockés dans un premier temps. Dans cette option, l'hypothèse est posée d'un temps dédié à de la R&D supplémentaire entre 2019 et 2070 pour trouver une autre solution robuste pour les déchets HA et un site afférent. La décision de gestion pour ces déchets est prise en 2070. En fonction des résultats de la recherche, la solution prospective est mise en place, ou pas, pour les déchets HA. En cas de recherche infructueuse ou de solution insuffisamment sûre ou trop onéreuse, les déchets HA sont finalement stockés dans le centre de stockage Cigéo ;
- **L'option 3** désigne une configuration où les premiers investissements du centre de stockage Cigéo sont réalisés. En parallèle, entre 2019 et 2070, des efforts de R&D sont entrepris en vue de trouver une autre solution que Cigéo pour la mise en sécurité définitive à long terme, à la fois pour les

³² Dans un souci d'exhaustivité de l'analyse, des variantes ont été modélisées. Une variante de l'option 4 consistant en de l'entreposage décidé dès le début de la période analysée, sans tentative de trouver une solution de mise en sécurité définitive, permet notamment d'estimer un bénéfice assurantiel comme différence entre l'option jugée sûre et l'option jugée risquée (voir chapitre 7). Une variante de l'option de projet 1 (mise en place du centre de stockage Cigéo) décalant de 10 et 20 ans les prises de décisions a également été modélisée, interrogeant le poids de l'actualisation par rapport aux coûts additionnels liés à un entreposage décalé de 10 ou 20 ans. (cf. Chapitre 5.2.4).

³³ Notons que la technologie de forage profond ne répond pas à l'exigence de réversibilité.

déchets HA et pour les déchets MA-VL. Plusieurs possibilités s'ouvrent alors en fonction du succès desdites recherche et de leur coût ;

- **L'option 4** désigne une configuration où les premiers investissements du centre de stockage Cigéo ne sont pas réalisés, ce qui conduit à considérer un report de décision avec en parallèle, des efforts de R&D réalisés pour trouver une autre solution de mise en sécurité définitive des déchets HA et des déchets MA-VL. Les résultats de cette R&D ne sont pas garantis. Par ailleurs, le report de la décision introduit une probabilité de perte du site d'implantation du centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne. Au final, douze branches sont alors obtenues en 2070, dont huit distinctes, en fonction de la perte ou pas du site actuel de Meuse/Haute-Marne, de l'issue de la recherche pour les déchets HA, de l'issue de la recherche pour les déchets MA-VL, et le cas échéant de l'issue de la recherche d'un nouveau site d'implantation pour le centre de stockage Cigéo. Deux de ces branches conduisent à laisser indéfiniment les déchets radioactifs sur leurs sites actuels d'entreposage, ce qui revient à une solution reposant sur l'intervention active de la société quant à la gestion de ces déchets radioactifs, sans mise en sécurité définitive. Ces branches sont orthogonales à la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, mais d'une part, rien ne permet de garantir que d'ici à 2070 la loi n'évoluera pas, et d'autre part, l'existence de ces branches permet de mettre en lumière les risques associés à l'entreposage de longue durée renouvelé.

Les options sont décrites dans le détail dans les chapitres suivants.

4.3 Option de projet 1 : le centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra

L'objet de ce chapitre est de décrire une configuration où le décideur public lance, après avis favorable de l'ASN, la réalisation du centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi, afin que tous les déchets soient gérés en ayant recours au stockage géologique profond pour leur mise en sécurité définitive.

Le lecteur pourra se référer au chapitre 2.4 du présent document pour une description plus détaillée des différentes phases, selon l'avancement au stade d'avant-projet détaillé ; ces phases seront précisées ultérieurement dans le cadre de la demande d'autorisation de création.

Dans cette évaluation socioéconomique, une présentation volontairement schématique des phases est adoptée, notamment en ce qui concerne les dates et leur enchaînement, et résulte d'un compromis entre la vision à ce jour des études d'avant-projet, celle en vigueur à la date de l'esquisse et un angle nécessairement plus synthétique pour les besoins de l'évaluation. Rappelons ici que la finalité de cette présentation est de permettre l'estimation de l'option de projet 1, afin d'être intégrée dans l'évaluation socioéconomique et de faciliter la comparaison aux autres options.

Ainsi, dans la suite du présent rapport, comme dans ses illustrations, la schématisation de l'option de projet 1 fera ainsi référence à : la **construction initiale** et la **phase industrielle pilote** avec les **essais actifs et inactifs**, le **fonctionnement** et le **démantèlement**. Les autres phases, non citées expressément, sont toutefois intégrées dans l'échéancier des coûts considéré.

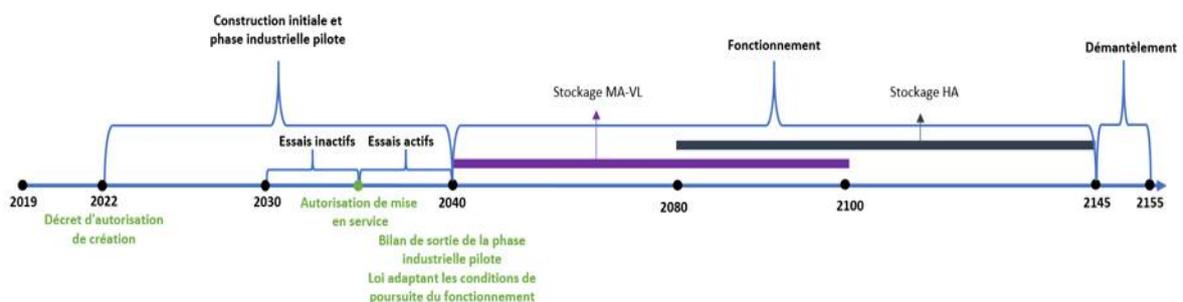
Si la phase de conception fait référence à des périodes antérieures à 2019 (brièvement décrits dans le chapitre 2.4 du présent document), la comptabilisation des coûts et bénéfices des différentes options s'effectue à partir de l'année 2019, en euros 2019. En d'autres termes, certains coûts de mise en place du projet Cigéo sont considérés comme échoués et non comptabilisés par cette évaluation. Ce choix se justifie par le fait que l'évaluation doit servir à éclairer les choix de demain ; on note par ailleurs que ces coûts échoués sont marginaux.

Concernant les dates considérées dans cette évaluation socioéconomique, notons qu'elles résultent d'hypothèses temporelles faites sur le phasage de Cigéo issu des études d'avant-projet et décrit dans le chapitre 2.4 du présent document. Ainsi, les hypothèses temporelles de cette évaluation socioéconomique sont les suivantes, les phases s'enchaînant de manière séquentielle ;

- la phase industrielle pilote du projet, qui démarre par la phase de construction initiale, positionne ici le démarrage des essais inactifs à l'horizon de 2030 puis, après autorisation de mise en service, enchaîne avec les essais actifs pour s'étendre sur une période de 10 ans au total ;
- le fonctionnement est ici positionné à l'horizon de 2040, après bilan de sortie de la phase industrielle pilote et une loi adaptant les conditions de poursuite du fonctionnement, avec :
 - ✓ dans un premier temps, le stockage des déchets MA-VL intervenant entre 2040 et 2100 ;
 - ✓ dans un second temps, le stockage des déchets HA intervenant en décalé entre 2080 et 2145, lorsqu'ils auront suffisamment refroidi pour pouvoir être stockés dans le centre de stockage Cigéo ;
 - ✓ la fin de la phase de fonctionnement est ainsi imaginée en 2145, le centre de stockage Cigéo étant démantelé progressivement ensuite ;
- le démantèlement est ici positionné à l'horizon de 2145, et s'étend sur une période de 10 ans jusqu'en 2155.

À ce stade, les déchets radioactifs seront dans le centre de stockage Cigéo, lui-même fermé, et ne nécessitant plus d'actions humaines. Il est alors attendu que le moment venu, la couverture géologique prenne le relais pour garantir sur des temps très longs le confinement des radionucléides et la protection de l'homme et de l'environnement, conduisant ainsi à un processus de surveillance passive.

La Figure 4.3-1 ci-dessous représente le calendrier illustratif de l'option de projet 1 de Cigéo, schématisé dans cette évaluation socioéconomique avec ses différentes phases :



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0021-B

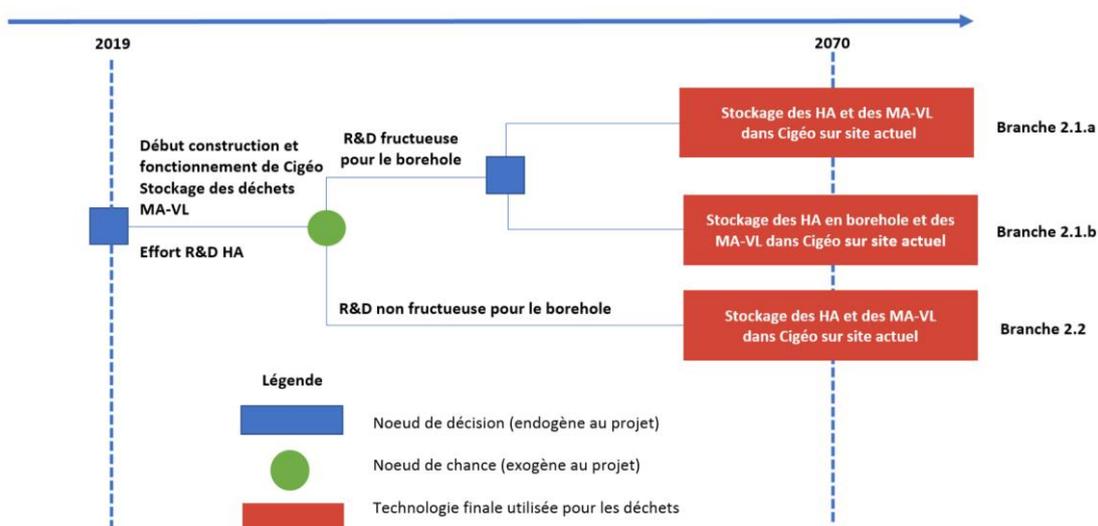
Figure 4.3-1 Calendrier illustratif de l'option de projet 1

Une variante de l'option de projet 1 consistant à décaler la date de démarrage des travaux du centre de stockage Cigéo de 10 et 20 ans, a été modélisée pour mettre en évidence le poids de l'actualisation (cf. chapitre 5.2.4). Toutefois la modélisation de cette procrastination (report des décisions, sans tentative de trouver des solutions alternatives de mise en sécurité définitive) est un exercice numérique visant simplement à refléter l'importance des échéanciers de coûts. Il ne s'agit pas d'une description complète de ce qu'il se passerait vraisemblablement en cas de décision de ne pas lancer tout de suite les investissements du centre de stockage Cigéo (des efforts de R&D seraient probablement entrepris), ni des risques auxquels cette décision exposerait (risque de perdre le site de Meuse/Haute-Marne, exposition au risque d'accident, etc.)

4.4 Option 2 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA

L'option 2 désigne une configuration où le décideur public lance la construction initiale du centre de stockage Cigéo, ainsi que la phase industrielle pilote, en vue de stocker des déchets MA-VL. La différence par rapport à l'option de projet 1 concerne les déchets HA : dans l'option 2, le décideur public entreprend un effort en R&D ciblé sur ces déchets, en vue de trouver une autre solution de mise en sécurité définitive que le stockage géologique profond³⁴. Cet effort dure de 2019 à 2070, date à laquelle une décision est prise quant à la solution de mise en sécurité définitive appropriée.

La figure 4.4-2 représente l'option 2, avec ses différents nœuds : nœuds de décision (endogènes au projet) et nœuds de chance (exogènes au projet).



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0022-B

Figure 4.4-1 Arbre de décision pour l'option 2

La décision initiale comprend les principaux éléments suivants :

- La construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo sont réalisées, ainsi que le début du stockage pour les MA-VL, suivant le même calendrier que dans l'option de projet 1 ;
- un montant de R&D de 70 millions d'euros est investi chaque année³⁵ jusqu'en 2070, dans le but de trouver une technologie de mise en sécurité définitive plus efficiente que le stockage géologique profond pour les déchets HA. Pour fixer les idées, et ultérieurement, estimer le coût d'une alternative au stockage géologique profond (comme le requiert l'évaluation socioéconomique), il a été nécessaire de définir une autre technologie prospective possible. Compte tenu de l'état actuel des

³⁴ La solution prospective considérée dans le cadre de cette évaluation socioéconomique est le forage profond (deep borehole, indifféremment nommé ici borehole). Une définition de cette technologie est présentée dans le chapitre 4.1.3. Le choix de cette technologie est conventionnel et tient à la disponibilité de données en vue de l'évaluation monétaire qu'il est besoin de faire, ainsi qu'à l'intérêt témoigné par de nombreux pays pour cette solution.

³⁵ La justification du montant des 70 M€/an est détaillée dans le chapitre 5.1 du présent document.

connaissances, c'est le forage profond (deep borehole³⁶, appelé indifféremment borehole dans ce rapport) qui a été retenu, car il est le plus documenté ;

- en 2070, un bilan est dressé et mène à trois possibilités, représentées par les trois branches du graphique ci-dessus (2.1.a, 2.1.b et 2.2).

La **branche 2.1** correspond à la situation où, suite aux efforts de R&D, une technologie prospective alternative de mise en sécurité définitive pour les HA serait trouvée. Par recherche fructueuse, il faut considérer une technologie :

- qui répondrait aux normes de sûreté françaises, incluant des études de faisabilité et un démonstrateur ;
- et pour laquelle un site d'implantation de cette technologie prospective pour les HA serait trouvé.

Cette branche 2.1 se divise ensuite en deux sous-branches, correspondant à l'arbitrage sur les coûts. A niveau de sûreté et d'efficacité équivalent, le décideur public choisira entre :

- la branche 2.1.a, revenant à stocker les déchets HA dans le centre de stockage Cigéo si la mise en place de la technologie prospective est plus coûteuse que le stockage géologique profond ;
- la branche 2.1.b, revenant à stocker les déchets HA dans la technologie prospective s'il apparaît que celle-ci est moins coûteuse que le stockage géologique profond. Dès lors, la décision est prise et l'installation de forage profond est construite, suivie également d'une phase industrielle pilote et d'une phase de fonctionnement.

La figure 4.4-2 représente le calendrier illustratif de la technologie prospective de forage profond à partir de 2070. En parallèle, le centre de stockage Cigéo continue d'être exploité jusqu'à la fin du stockage des déchets MA-VL en 2100, puis fermé entre 2100 et 2109.

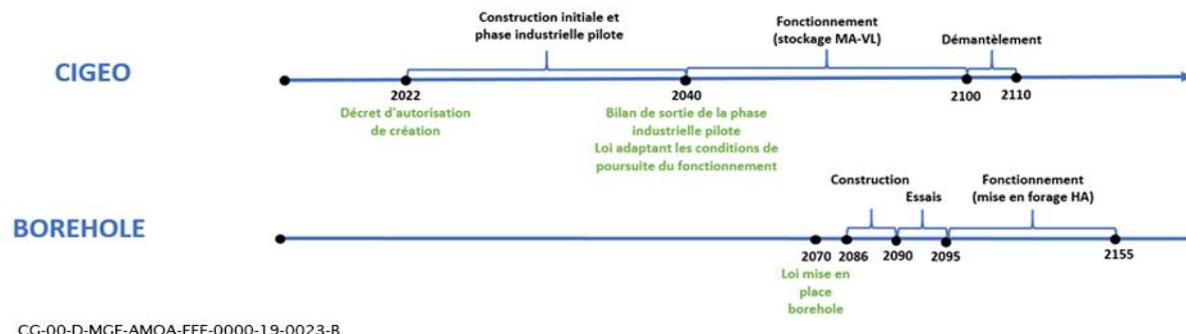


Figure 4.4-2 Calendrier illustratif de la branche 2.1.b

La **branche 2.2** correspond à la situation où l'investissement en R&D réalisé jusqu'en 2070 sur les déchets HA est infructueux. Ainsi, le stockage des déchets HA est réalisé au sein du centre de stockage Cigéo, conformément au phasage défini dans l'option de projet 1, à savoir entre 2080 et 2145. Les périodes de stockage des MA-VL (entre 2040 et 2100) et de fermeture (entre 2145 et 2155) sont ici inchangées.

Au final dans l'option 2, on note que parmi les trois branches de cet arbre de décision, deux choix de configuration de gestion sont possibles :

- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo (branches 2.1.a et 2.2) ;

³⁶ Pour une discussion sur les technologies de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs ayant fait l'objet d'études en France et à l'international, se reporter au chapitre 2.5 et au chapitre 4.1.

- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, tandis que les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branches 2.1.b).

4.5 Option 3 : réalisation du centre de stockage Cigéo et parallèlement, des efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL

L'option 3 désigne une configuration où le décideur public décide la réalisation de la construction initiale du centre de stockage Cigéo et la phase industrielle pilote. Toutefois en 2040, il n'engage pas la phase de fonctionnement pour le stockage géologique des déchets MA-VL dans le centre de stockage Cigéo. En effet, il engage dès à présent, en même temps que les premières constructions sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne, des efforts de R&D supplémentaires pour trouver une autre solution que Cigéo pour la mise en sécurité définitive des déchets MA-VL et HA. Cet investissement se traduit par un montant annuel de R&D de 140 millions d'euros³⁷ jusqu'en 2070.

La décision initiale extrêmement prudente de réaliser la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo permet de se prémunir du risque de perdre le site de Meuse/Haute-Marne, au cas où la recherche d'alternative au stockage géologique profond ne serait pas fructueuse³⁸. Le décideur public reste donc soucieux de laisser ouverte la voie du stockage géologique profond.

La figure 4.5-1 représente l'option 3, avec ses différents nœuds de possibilités.

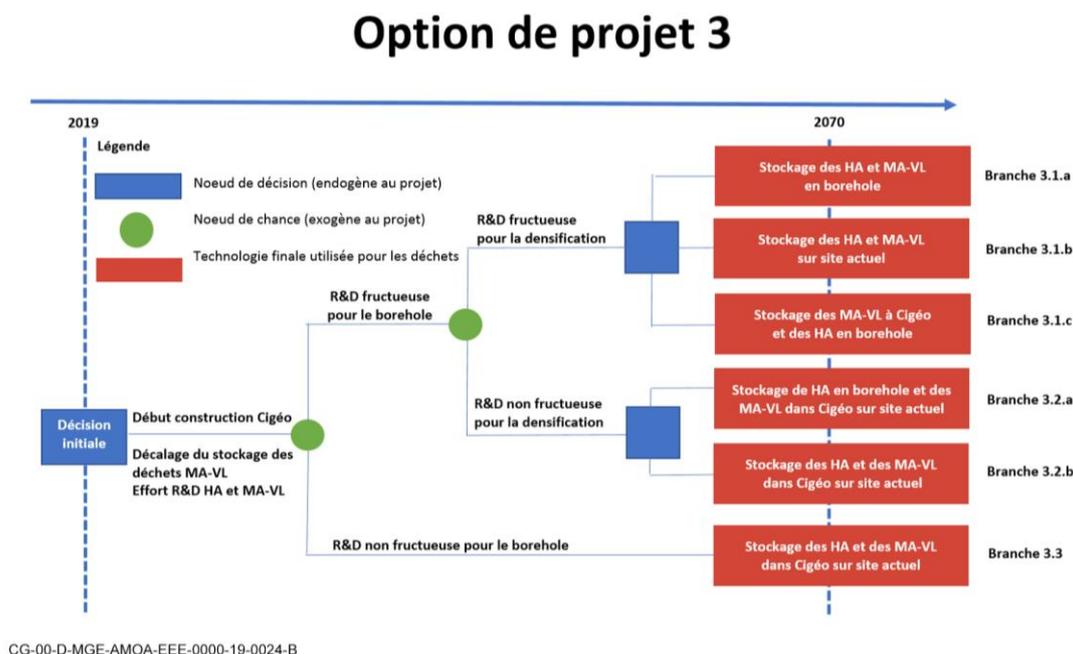


Figure 4.5-1 Arbre de décision pour l'option 3

³⁷ La justification du montant des 140 M€/an est détaillée dans les chapitres 5.1.4 et 5.1.5 du présent document.

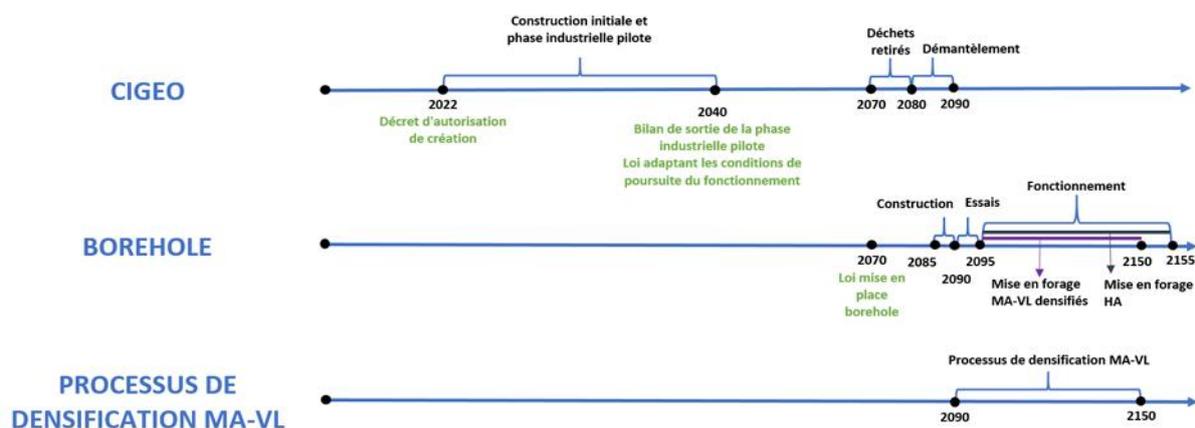
³⁸ Comparativement au coût de la recherche d'un site et à la probabilité d'en trouver un, comme nous le verrons dans le chapitre 5, l'investissement initial du centre de stockage Cigéo se justifie. Par ailleurs, d'après les ingénieurs de l'Andra, l'investissement initial du centre de stockage Cigéo est déjà très optimisée. Enfin, la stratégie qui consiste à prendre le risque de perdre le site de Meuse/Haute-Marne est modélisée par l'intermédiaire de l'option 4.

Comme dans l'option 2, la décision initiale de l'option 3 comprend les éléments principaux suivants :

- La construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo sont réalisées. Contrairement aux options 1 et 2, la phase de fonctionnement de stockage des MA-VL ne démarre pas en 2040, puisqu'on se laisse jusqu'en 2070 pour qu'une chance de trouver une autre solution que le stockage géologique profond adienne. Toutefois entre 2040 et 2070, des dépenses de jouvence sont réalisées, afin de pouvoir reprendre les travaux de Cigéo immédiatement en 2070 si la R&D n'est pas fructueuse ;
- Un montant de R&D de 140 millions d'euros est investi chaque année jusqu'en 2070, dans le but de trouver une technologie prospective de mise en sécurité définitive plus efficace que le stockage géologique profond pour les déchets HA et pour les déchets MA-VL ;
 - ✓ de la même façon que dans l'option 2, dans la mesure où il conviendra, pour les besoins conventionnels de l'évaluation socioéconomique, de chiffrer les coûts des différentes branches, il est nécessaire de fixer une technologie prospective possible. Comme pour l'option 2, s'agissant des déchets HA, c'est la technologie du forage profond (deep borehole) qui est envisagée par l'évaluation socioéconomique. Pour les déchets MA-VL, à titre conventionnel, il sera fait référence à des techniques de prétraitement des colis par un processus de densification, puis à une mise en forage profond (cf. chapitre 4.1.3 du présent document pour plus d'explications sur cette technologie). En effet, les colis MA-VL sont trop volumineux pour être mis directement en forage profond ;
- en 2070, un bilan est dressé et mène à six possibilités, représentées par les six branches du graphique ci-dessus.

Les branches 3.1.a, 3.1.b et 3.1.c correspondent à la situation où la recherche est fructueuse, à la fois pour les HA et pour les MA-VL : les technologies de mise en sécurité définitive prospectives sont disponibles à un niveau de sûreté au moins équivalent à celui de l'option de projet 1 et un site est trouvé pour les mettre en œuvre. Ces branches se séparent ensuite à l'épreuve des coûts :

- **dans la branche 3.1.a**, si les technologies prospectives possibles sont moins coûteuses à mettre en œuvre que de stocker les HA et les MA-VL dans le centre de stockage Cigéo, alors la technologie prospective est mise en place : les déchets MA-VL sont densifiés, et ils sont mis en forage profond, avec les déchets HA. Notons dans ce cas que les déchets HA et MA-VL stockés dans le centre de stockage Cigéo pendant la phase industrielle pilote entre 2030 et 2040 sont retirés, et le centre de stockage Cigéo est fermé : les travaux de démantèlement ont lieu entre 2080 et 2089, avec l'hypothèse que les déchets sont retirés en 10 ans. La Figure 4.5-2 représente le calendrier illustratif de la branche 3.1.a avec le déroulement du centre de stockage Cigéo, et celui des technologies prospectives de processus de densification et de forage profond ;
- **dans la branche 3.1.b**, s'il apparaît moins coûteux de finalement mettre les déchets HA et les déchets MA-VL dans le centre de stockage Cigéo (pour lequel la construction initiale et la phase industrielle pilote ont été réalisées), plutôt que de mettre en œuvre la technologie prospective, alors la décision est prise de stocker les déchets MA-VL et les déchets HA dans le centre de stockage Cigéo. Ainsi, en 2070, les travaux reprennent dans le centre de stockage Cigéo qui est l'unique installation exploitée. Si les durées des chroniques de livraison des déchets HA et MA-VL vers le centre de stockage Cigéo (respectivement 60 ans et 65 ans) sont similaires à celles de l'option de projet 1, elles se chevauchent désormais : alors qu'elles se situaient entre 2040 et 2100 pour les MA-VL et 2080 et 2145 pour les HA dans l'option de projet 1 ; elles interviennent désormais entre 2070 et 2130 pour les MA-VL et entre 2080 et 2145 pour les HA dans la branche 3.1.b de l'option 3. Ainsi, comme dans l'option de projet 1, le centre de stockage Cigéo est fermé entre 2145 et 2155 ;
- **dans la branche 3.1.c**, s'il apparaît que la technologie prospective de densification est trop coûteuse, mais que la technologie prospective de forage est moins coûteuse que le stockage géologique profond, alors les déchets MA-VL sont stockés dans le centre de stockage Cigéo (pour lequel la construction initiale et la phase industrielle pilote ont été réalisées), et les déchets HA sont mis en forage profond.



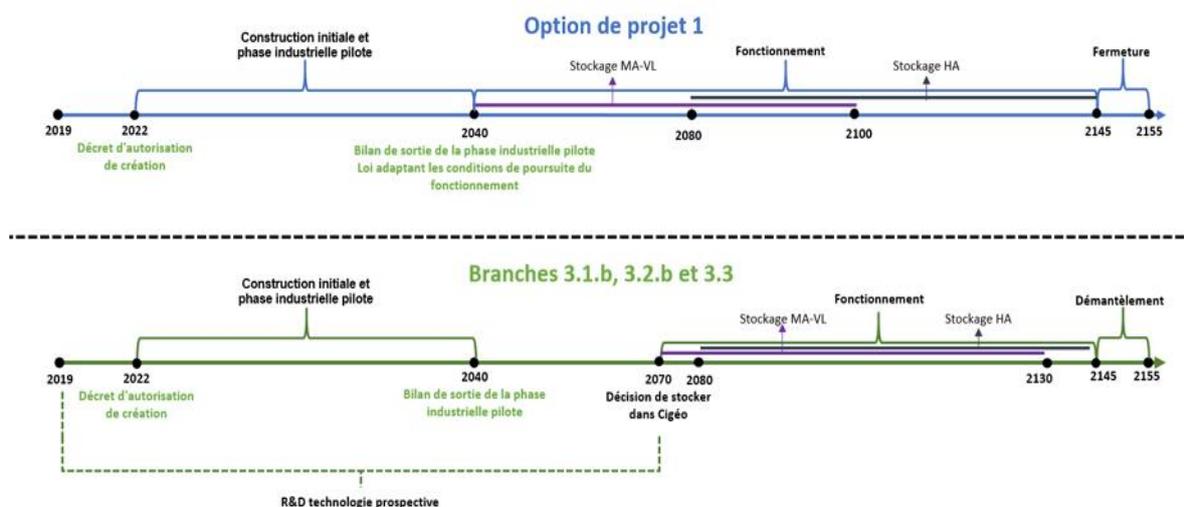
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0025-B

Figure 4.5-2 Calendrier illustratif de la branche 3.1.a

Les branches 3.2.a et 3.2.b correspondent à la situation où l'investissement en R&D réalisé jusqu'en 2070 est fructueux pour les déchets HA, mais infructueux pour les déchets MA-VL. A nouveau, la recherche fructueuse signifie que la technologie prospective de mise en sécurité définitive trouvée pour les déchets HA est au moins aussi sûre que le centre de stockage Cigéo et qu'un site d'implantation est trouvé. C'est alors que l'arbitrage des coûts intervient, distinguant les deux branches :

- Dans la **branche 3.2.a**, il est moins coûteux de mettre en œuvre la technologie prospective pour les HA que de les stocker dans le centre de stockage Cigéo. Dès lors, seuls les déchets MA-VL sont stockés dans le centre de stockage Cigéo (puisque la recherche sur la densification n'a pas été fructueuse), et les déchets HA sont stockés grâce à la technologie prospective, selon le même calendrier que dans le graphique ci-dessus. Pour les MA-VL, les constructions dédiées reprennent dans le centre de stockage Cigéo et les déchets y sont stockés entre 2070 et 2130 ;
- Dans la **branche 3.2.b**, malgré le succès de la recherche pour la gestion des déchets HA, sa mise en place est trop coûteuse par rapport au stockage géologique profond. Il est alors décidé de mettre les déchets MA-VL et les déchets HA dans le centre de stockage Cigéo.

Enfin, la **branche 3.3** correspond à la situation où la R&D n'est fructueuse ni pour le processus de densification, ni pour la technologie de forage profond. Ainsi, en 2070, les travaux reprennent dans le centre de stockage Cigéo qui est l'unique installation exploitée. Si les durées des chroniques de livraison des déchets HA et MA-VL vers le centre de stockage Cigéo (respectivement 60 ans et 65 ans) sont similaires à celles de l'option de projet 1, elles se chevauchent désormais : alors qu'elles se situaient entre 2040 et 2100 pour les MA-VL et entre 2080 et 2145 pour les HA dans l'option de projet 1, elles interviennent désormais entre 2070 et 2130 pour les MA-VL et entre 2080 et 2145 pour les HA dans la branche 3.3 de l'option 3 (cf. Figure 4.5-3). Ainsi, comme dans l'option de projet 1, le centre de stockage Cigéo est fermé entre 2145 et 2155.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0026-B

Figure 4.5-3 Calendrier illustratif de mise en place de Cigéo en option de projet 1 et en option 3, selon les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3

Notons l'absence d'une branche dans cette option 3, qui par symétrie aurait pu être envisagée, mais n'a toutefois pas été retenue. En effet, de la même façon qu'il existe une branche où la technologie prospective est trouvée pour les HA (niveau de sûreté équivalent à l'option de projet 1 et site disponible), mais pas pour les MA-VL (branches 3.2.a et 3.2.b), on aurait pu penser à une branche corollaire où une technologie prospective est trouvée pour les MA-VL, mais pas pour les HA.

Or, sur le plan de la logique, cette branche ne fait pas sens : en effet, l'hypothèse de recherche d'un processus de densification des MA-VL est par définition construite uniquement en vue d'une mise en forage de ces déchets par la suite, donc si elle est cherchée et opérationnelle, alors automatiquement, cela signifie que ladite technologie prospective de forage est disponible par défaut. Ainsi, si la technologie prospective de forage est disponible pour les MA-VL, elle l'est aussi pour les HA, ce qui est contradictoire avec la définition même de la branche, où on ne disposerait pas de technologie prospective pour les HA.

Au final dans l'option 3, on note ainsi que parmi les six branches de cet arbre de décision, trois configurations de gestion sont possibles :

- tous les déchets sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branche 3.1.a) ;
- les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, tandis que les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branches 3.1.c et 3.2.a) ;
- tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo (branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3).

4.6 Option 4 : efforts de recherche pour les déchets HA et MA-VL sans investissement dans le centre de stockage Cigéo

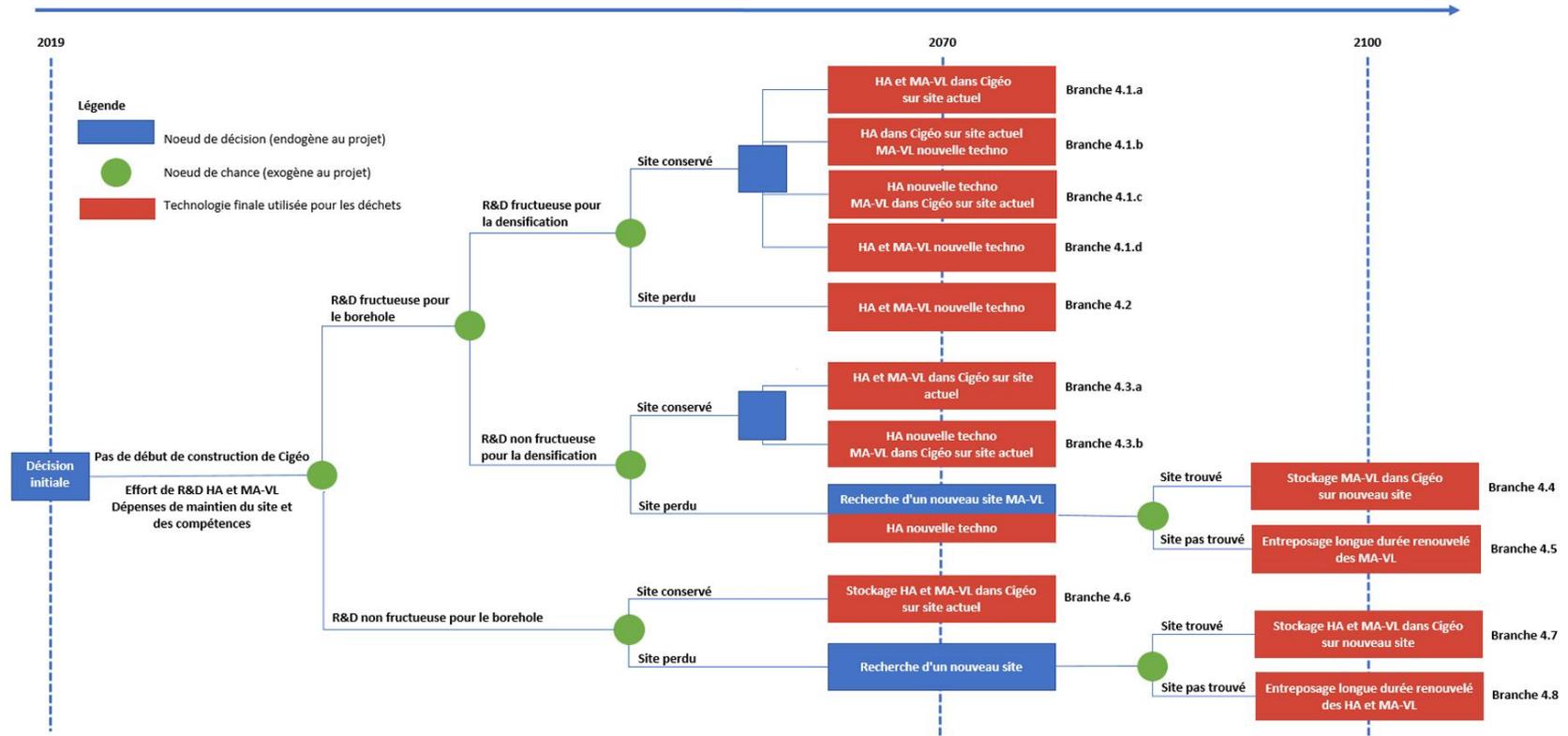
L'option 4 correspond à une configuration où le décideur public considère un report des premiers investissements du centre de stockage Cigéo : il n'engage pas la construction initiale, ni la phase industrielle pilote, et lance à la place des investissements de R&D pour tenter de trouver une solution prospective alternative de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL. Le montant annuel de R&D s'élève à 140 millions d'euros³⁹ jusqu'en 2070. Les résultats de cette R&D ne sont pas garantis. Par ailleurs, le report de la décision introduit une probabilité de perte du site d'implantation du centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne. Seules des dépenses de maintien du site⁴⁰ et de maintien des compétences sont réalisées afin de laisser ouverte la voie du stockage géologique profond ultérieurement.

En 2070, un bilan est dressé et mène aux 12 branches représentées dans la figure 4.6-1 et décrites ci-après.

³⁹ La justification du montant des 140 M€/an est détaillée dans le chapitre 5.1 du présent document.

⁴⁰ Les dépenses de maintien du site correspondent à des dépenses de communication, d'observations environnementales et des aides octroyées par les GIP (groupement d'intérêt public). Ces dépenses ne garantissent absolument pas que le site soit toujours mobilisable au cas où aucune solution alternative ne serait trouvée. L'ensemble de ces « coûts unitaires » est détaillé dans le chapitre 5.1 du présent document.

Option de projet 4



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0027-B

Figure 4.6-1 Arbre de décision pour l'option 4

Les branches **4.1.a** à **4.1.d** correspondent à une situation où la R&D est fructueuse tant pour les HA que pour les MA-VL (technologies prospectives de mise en sécurité définitive sûres et site de stockage trouvé) et où le site de Meuse/Haute-Marne est conservé. Tout est alors possible, et la décision s'opère sur des critères de coûts :

- Dans la **branche 4.1.a**, le décideur prendra la décision de mettre les déchets HA et MA-VL dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne car la technologie de stockage en couche géologique profonde reste plus économique.
- Dans la **branche 4.1.b**, la R&D permet de trouver une solution prospective plus économique pour les MA-VL que de les stocker dans le centre de stockage de Cigéo, alors que le stockage géologique profond reste plus économique pour les déchets HA. Dans ce cas, le décideur place alors les HA dans le centre de stockage de Cigéo, tandis que les MA-VL sont gérés grâce à la technologie prospective (comme dans les autres options, par convention, on retiendra une technologie de processus de densification, puis de mise en forage profond). Pour rappel en option 3, la possibilité de mise en œuvre d'une technologie de forage profond uniquement pour les déchets MA-VL n'est pas explorée, sachant que le stockage des déchets HA se ferait en couche géologique profonde au sein du centre de stockage Cigéo. En effet au sein de l'option 3, les premières constructions sont principalement vouées au stockage des déchets MA-VL. Effectuer cet investissement avant 2070, pour *in fine* stocker ces mêmes déchets avec une technologie de forage profond représenterait ainsi une « double peine ». En option 4, la construction initiale du centre de stockage Cigéo n'est pas entreprise. Il n'y a donc pas *a priori* de « double peine ».
- Dans la **branche 4.1.c**, si la R&D permet de mettre en œuvre une technologie prospective moins coûteuse pour les déchets HA que le stockage géologique profond, mais que la technologie prospective est plus coûteuse que le stockage géologique profond pour les déchets MA-VL, alors les déchets MA-VL vont dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne, et la technologie prospective est mise en place pour les déchets HA uniquement.
- Dans la **branche 4.1.d**, si la R&D permet de trouver une technologie prospective non seulement au moins aussi efficace, mais aussi moins coûteuse que le stockage géologique profond pour les déchets HA et MA-VL, alors la technologie prospective est mise en place pour les déchets HA et pour les déchets MA-VL.

La **branche 4.2** correspond à une situation où la R&D est fructueuse tant pour les HA que pour les MA-VL (technologies de mise en sécurité définitive sûres et site de forage trouvé) et où le site de Meuse/Haute-Marne est perdu. La décision est alors univoque : les déchets HA et les déchets MA-VL sont gérés grâce à la technologie prospective quel qu'en soit le coût. Ici par convention, il s'agit du forage profond (précédé d'un processus de densification pour les seuls MA-VL).

Les **branches 4.3.a** et **4.3.b** correspondent à la situation où seule la R&D pour les HA est fructueuse (technologie prospective de mise en sécurité définitive sûre et site trouvé) ; où elle est infructueuse pour les déchets MA-VL ; et où le site de Meuse/Haute-Marne est conservé. L'arbitrage de coûts distingue alors ces deux branches :

- Dans la **branche 4.3.a**, on met à la fois les déchets HA et MA-VL dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne car malgré le succès de la R&D pour les HA, la technologie prospective est plus coûteuse que le stockage géologique profond ;
- Dans la **branche 4.3.b** au contraire, la R&D donne pour les HA une technologie prospective moins coûteuse que le stockage géologique profond. Les HA sont donc stockés *via* la technologie prospective (ici par convention, le forage profond) et les déchets MA-VL sont stockés en couche géologique profonde dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne.

Les **branches 4.4** et **4.5** sont caractérisées par le fait que seule la R&D pour les HA est fructueuse (technologie prospective de mise en sécurité définitive sûre et site trouvé) ; elle est infructueuse pour les déchets MA-VL ; et le site de Meuse/Haute-Marne est perdu. Dès lors, le choix de la technologie prospective (par convention, le forage profond) est effectué en 2070. Les déchets HA sont stockés grâce à cette technologie à partir de 2091, et une recherche de nouveau site de stockage en couche géologique profonde est entreprise pour gérer les déchets MA-VL en remplacement du site de Meuse/Haute-Marne, entre 2070 et 2100 :

- Dans la **branche 4.4**, un nouveau site est trouvé pour le stockage géologique profond des MA-VL, cette solution est alors mise en place, sur le nouveau site. Les déchets HA eux, ont été stockés grâce à la technologie prospective puisque la R&D a été fructueuse ;
- Dans la **branche 4.5**, aucun nouveau site n'est trouvé pour réaliser un stockage géologique profond en vue de stocker les déchets MA-VL. Alors que la technologie prospective alternative a été choisie pour la gestion des déchets HA à partir de 2070, les déchets MA-VL, eux, sont entreposés pour une longue durée sur leurs sites, avec renouvellement des entrepôts.

La **branche 4.6** correspond à la situation où la R&D est infructueuse pour les HA. Par convention, une technologie de forage profond était recherchée. A fortiori, elle n'est donc pas non plus fructueuse pour les MA-VL (par convention, la technologie prospective recherchée pour les MA-VL était le processus de densification puis le forage profond). Mais puisque le site de Meuse/Haute-Marne est conservé, alors la construction du centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne démarre à partir de 2070, et les déchets HA et MA-VL peuvent y être stockés ensuite.

Enfin, dans les **branches 4.7. et 4.8**, non seulement la recherche est infructueuse tant pour les HA que pour les MA-VL, mais le site de Meuse/Haute-Marne est également perdu. En 2070, une nouvelle recherche de site pour un stockage géologique profond est relancée :

- Dans la **branche 4.7.**, un nouveau site est trouvé pour un stockage géologique profond, qui est alors mis en œuvre ;
- Dans la **branche 4.8**, aucun nouveau site n'est trouvé pour réaliser un stockage géologique profond. Dès lors, le décideur est contraint à l'entreposage de longue durée renouvelé pour les déchets HA et MA-VL jusqu'à la fin de la période d'étude (2600).

Au final dans l'option 4, on note ainsi que parmi les douze branches de cet arbre de décision, huit configurations de gestion sont possibles :

- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo à partir de 2080 (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 et les déchets HA sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne à partir de 2080 (branche 4.1.b) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne à partir de 2080 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.1.c et 4.3.b) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.1.d et 4.2) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2100 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.4) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.5) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2100 (branche 4.7) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 (branche 4.8).

On relèvera que les branches 4.8 et 4.5 sont les seules à ne pas conduire à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs (entreposage de longue durée renouvelé). Comme nous le verrons dans le chapitre 6, et plus tard dans le chapitre 7, l'entreposage de longue durée renouvelé, en tant que mode de gestion nécessitant l'intervention active de l'homme, est susceptible de générer des coûts supplémentaires que les solutions de mise en sécurité définitive permettent d'éviter : un coût psychologique lié au transfert du risque accidentel et à la menace de tomber dans un scénario KO. Par ailleurs, bien que contraire à la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4), cet entreposage de longue durée

renouvelé a été modélisé pour schématiser toutes les issues possibles de l'option 4. Un autre parti pris aurait pu être de modéliser des dépenses de R&D jusqu'à ce qu'une solution de mise en sécurité définitive et/ou un site afférent soient trouvés.

Toutes les options ayant été définies et décrites, il convient désormais de s'intéresser à leurs coûts et à leur calendrier de mise en place (cf. chapitre 5), ainsi qu'à leurs bénéfices (cf. chapitre 6 du présent document).

5

Quantification des coûts des différentes options

5.1	Coûts unitaires, prix relatifs, aléas et probabilité	110
5.2	Coût de l'option de projet 1	142
5.3	Coût de l'option 2	149
5.4	Coût de l'option 3	156
5.5	Coût de l'option 4	163
5.6	Récapitulatif du coût des options	178



Ce chapitre est dédié à l'estimation des coûts des différentes options décrites dans le chapitre 4. Dans la mesure où des catégories de coûts semblables se retrouvent d'une option à l'autre, ce chapitre commence avec une description de ces catégories de coûts appelés « coûts unitaires » et de ce qu'elles contiennent. Puis les chapitres 5.2 à 5.5 du présent document, décrivent et représentent graphiquement les coûts bruts des options, ainsi que les coûts actualisés et scénarisés de chacune des quatre options. Le chapitre 5.6 propose en conclusion un récapitulatif du coût des quatre options.

5.1 Coûts unitaires, prix relatifs, aléas et probabilité

Le coût de chaque option de projet est fondé sur une série de coûts unitaires⁴¹ qui peuvent être communs d'une option à l'autre, ou d'une branche à l'autre. Ce chapitre vise à décrire ces coûts unitaires : coûts de mise en place de Cigéo, coût de la R&D, coût de recherche de site décliné dans le cas d'une technologie prospective ou dans celui d'un nouveau site pour le stockage géologique profond, coût d'une technologie prospective modélisant les coûts de mise en place et de fonctionnement lorsque cette technologie prospective concerne les déchets HA et lorsqu'elle traite les déchets MA-VL, coût d'entreposage, coût de transport des colis de déchets radioactifs, coût de maintien des compétences et coût de maintien du site de Meuse/Haute-Marne.

Le raisonnement calculatoire pour chacun de ces coûts unitaires, ainsi que leur vraisemblable évolution dans le temps (élasticité par rapport au PIB) sont détaillés ci-après dans les chapitres 5.1.1 à 5.1.11 du présent document.

Les aléas qui peuvent peser sur ces coûts sont discutés au chapitre 5.1.12 du présent document, menant à l'affectation d'une distribution probable des coûts unitaires. Enfin, le chapitre 5.1.13 concerne les probabilités de succès des chantiers de recherche entrepris dans les différentes options.

5.1.1 Coût de mise en place de Cigéo⁴²

5.1.1.1 Le chiffrage de l'esquisse réalisé par l'Andra en 2014

En 2014, à la demande du ministère chargé de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, l'Andra a proposé une évaluation des coûts du projet Cigéo en phase esquisse dans les tomes 1 et 2 de son « Évaluation des coûts afférents à la mise en place des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue » (Andra (66) (67)). Cette évaluation a servi de base au coût arrêté par la Ministre (6), décrit dans le chapitre suivant et qui servira de référence pour l'analyse des coûts de Cigéo dans ce rapport.

Le chiffrage de l'esquisse réalisé par l'Andra en 2014 se base sur l'hypothèse d'inventaire de référence décrite précédemment et couvre les coûts d'investissement, de fonctionnement et de démantèlement de Cigéo, ainsi que d'autres dépenses, notamment liées à la fiscalité ou à la R&D. Les dépenses sous maîtrise d'ouvrage des producteurs de déchets, en particulier le conditionnement des déchets avant leur transport jusqu'au centre de stockage Cigéo, ne sont pas considérées dans le chiffrage esquisse de Cigéo. De plus, cette évaluation des coûts est réalisée sur la base des connaissances scientifiques et techniques actuelles et ne préjuge pas des innovations techniques futures ni des évolutions de contexte réglementaire.

⁴¹ Par coût unitaire, nous entendons « catégorie de coûts », ou « composantes du coût global de l'option ». Certains de ces coûts unitaires se retrouvent dans les différentes options, comme par exemple le coût de R&D, ou le coût d'une solution prospective, mais à des horizons temporels différents. Ces coûts unitaires sont estimés sur la base des informations publiques disponibles et de travaux académiques.

⁴² Il est rappelé ici que le terme « coût de Cigéo » utilisé dans ce rapport correspond à l'évaluation des coûts afférents à la mise en place de la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et moyenne activité à vie longue, telle qu'arrêtée par la Ministre en 2016.

Par ailleurs, le chiffrage esquisse réalisé par l'Andra considère les coûts à partir de l'année 2012 (début de la conception industrielle) et jusqu'en 2156 (fin de la fermeture et du démantèlement du centre de stockage). Les coûts estimés par l'Andra sont exprimés aux conditions économiques de 2012. À noter que dans ce chapitre les coûts ne sont pas actualisés.

Ainsi, sur un coût total d'environ 35 milliards d'euros, évalué sur la période entre 2012 et 2156, les coûts d'investissement global du projet Cigéo représentent 17 milliards, soit près de 50 %. Ces coûts sont dépensés à la fois pendant la phase de construction initiale, pendant la phase industrielle pilote, et pendant la phase de fonctionnement (extension incrémentale des installations).

Les **coûts d'investissement** sont ventilés en différentes catégories :

- Les coûts relatifs au process nucléaire. Le process nucléaire vise à assurer l'acheminement des colis de déchets radioactifs HA et MA-VL depuis leur réception en surface sur le centre de stockage jusqu'à leur emplacement de stockage en souterrain. Ce process comprend différentes opérations internes à l'installation Cigéo, comme l'accostage des hottes de transfert en surface, le transfert des colis, leur contrôle, la mise en stockage et enfin à permettre leur retrait en cas d'exigence de récupérabilité.
- Les coûts relatifs aux installations nucléaires de surface. Le premier bâtiment nucléaire, le bâtiment dit EP1, sera utilisé pour la gestion des déchets MA-VL et des déchets HAO (les déchets HA refroidis stockés en phase industrielle pilote). Le second bâtiment nucléaire, le bâtiment dit EP2, sera construit plus tard et servira à la gestion des autres déchets HA (HA1/HA2) qui seront réceptionnés après 2080. Pour la desserte du centre de stockage Cigéo, il est prévu une installation terminale embranchée avec son terminal ferroviaire nucléaire, une zone de déchargement des convois, plusieurs zones de déchargement des emballages, une zone de réception et stockage des conteneurs, une zone de conditionnement, des zones pour les hottes, et des zones de contrôle, etc. Ainsi, selon l'esquisse, EP1 fait une surface développée d'environ 94 000 m² (celle d'EP2 étant de 63 000 m²).
- Les coûts relatifs aux installations conventionnelles de surface comprennent notamment les équipements pour les activités liées aux fonctions d'accueil des travailleurs, des visiteurs et du public, les activités de gestion administrative, les activités liées à la sécurité des personnes et des biens, etc.
- Les coûts relatifs aux liaisons surface - fond et aux ouvrages souterrains. Les liaisons entre la surface et le souterrain où est situé le stockage sont assurées par deux descenderies et par cinq puits. Les descenderies sont pour l'une dédiée au transfert des colis de déchets et pour l'autre dédiée à l'accès des équipes de sécurité. Deux des puits sont dédiés au fonctionnement de l'installation de stockage, et trois aux travaux. Le souterrain comporte des zones de soutien logistique, des galeries d'accès et des alvéoles de stockage organisées en zones : une zone de stockage MA-VL, une zone de stockage pilote HA et une zone de stockage pour les déchets HA fortement exothermiques (HA1/HA2).
- Les coûts relatifs aux installations transverses couvrent notamment les terrassements généraux du site, voiries, parkings, aires de stationnement et réseaux divers, les bâtiments de tri des déchets conventionnels, l'alimentation en électricité, etc. ;
- Les coûts relatifs aux utilités externes et aménagements hors site. Ils concernent notamment l'amenée des différentes utilités : réseaux d'eau, d'électricité, de télécommunications, et le raccordement aux réseaux routiers et ferroviaires (déviation de la route départementale 60/960 ; mise à niveau et prolongement de la ligne ferroviaire 027000) ;
- Les coûts relatifs aux conteneurs de stockage concernent, les conteneurs dans lesquels sont positionnés, le cas échéant, un ou plusieurs colis de déchets (dits colis primaires), afin de constituer des colis de stockage ;
- Les coûts relatifs au système de transfert surface - fond comprend l'équipement des descenderies avec le funiculaire, ses aménagements auxiliaires et les moyens de rapatriement de la hotte dans toutes les conditions de panne ou de dysfonctionnement.

Les **autres coûts de Cigéo** (hors investissement donc) se répartissent en 6 sous-familles :

- les coûts de maîtrise d'œuvre, actuellement estimés par l'Andra à environ 13 % de l'investissement ;
- les coûts de maîtrise d'ouvrage, dont l'assistance à maîtrise d'ouvrage réglementaire, actuellement estimés par l'Andra à environ 6 % de l'investissement ;
- les coûts d'assurance travaux ;
- les coûts de fonctionnement, qui contiennent plusieurs sous-catégories, comme le personnel, les fluides, la maintenance, etc. ;
- les coûts liés aux impôts et taxes, dont certains sont liés à l'emprise foncière du centre de stockage Cigéo (comme la taxe foncière), et d'autres sont liés à son fonctionnement (TVA, taxe de stockage, etc.) ;
- les coûts liés aux activités sous maîtrise d'ouvrage Andra (laboratoire souterrain, essais, simulation, observation de l'environnement, communication et insertion territoriale).

» LA FISCALITÉ DU PROJET GLOBAL CIGÉO

Le modèle fiscal applicable au projet global Cigéo n'est pas encore défini. Lors du comité de haut niveau (CHN) du 4 octobre 2019, une réunion de lancement d'une concertation s'est tenue sous l'égide du Préfet de la Meuse, Préfet coordonnateur du projet Cigéo. Il s'agit de définir, avec les élus du territoire, le modèle fiscal à appliquer (modèle commun ou modèle spécifique). A l'issue de cette concertation, le gouvernement proposera au Parlement d'adopter ces dispositions dans le cadre du projet de loi de finances.

Selon le régime fiscal en vigueur, les installations du centre de stockage Cigéo sont soumises aux impôts et taxes suivantes :

- La fiscalité nationale repose sur :
 - ✓ **La taxe sur les installations nucléaires de base (INB)** est due par l'exploitant à compter de l'autorisation de création de l'installation et jusqu'à la décision de radiation de la liste des installations nucléaires de base (cf. article 43 de la loi n°99-1172 du 30 décembre 1999 de finances pour 2000).
 - ✓ **La contribution IRSN**, il s'agit d'une contribution annuelle au profit de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire due par les exploitants des installations nucléaires de base, à compter de l'autorisation de création de l'installation et jusqu'à la décision de radiation de la liste des installations nucléaires de base (cf. loi n° 2010-1658 du 29 décembre 2010 de finances rectificative pour 2010).
Le plafonnement de la contribution économique territoriale à la valeur ajoutée (cf. définition ci-après). Cette contribution économique territoriale est plafonnée à 3 % de la valeur ajoutée produite par l'entreprise, afin de ne pas pénaliser les entreprises qui investissent (cf. article 1647 B sexies du Code général des impôts). Concrètement, une demande de dégrèvement est adressée chaque année par l'Andra à la Direction générale des entreprises afin de se faire rembourser le différentiel. Ce dégrèvement est à la charge de l'État et est donc sans impact sur les ressources des collectivités locales ; c'est une dépense pour l'État au niveau national.
- La fiscalité directe locale repose sur :
 - ✓ **La contribution économique territoriale (CET)**, composée de :
 - **La cotisation foncière des entreprises (CFE)**, calculée sur la valeur locative des biens fonciers (cf. article 1447 de la loi de finances).
 - **La cotisation sur la valeur ajoutée des entreprises (CVAE)** est égale à une fraction de la valeur ajoutée produite par l'entreprise déterminée selon le niveau du chiffre d'affaires du groupe (cf. article 1586 ter du Code général des impôts).

- ✓ **La taxe foncière**, comprenant :
 - **La taxe foncière sur les propriétés bâties** (TFPB) (cf. articles 1380-1381 du Code général des impôts).
 - **La taxe foncière sur les propriétés non bâties** (TFPNB) (cf. article 1393 du Code général des impôts).
- ✓ **La taxe dite « de stockage »**.

Il s'agit d'une taxe additionnelle à la taxe sur les installations nucléaires de base. Son montant est déterminé, selon chaque catégorie d'installation destinée au stockage définitif de substances radioactives, par application d'un coefficient multiplicateur (fixé par décret en Conseil d'État après avis des collectivités territoriales concernées) à une somme forfaitaire (issu du produit de la capacité du stockage par une imposition au mètre cube).

La taxe additionnelle de stockage est due à compter de l'autorisation de création jusqu'à la fin de l'exploitation des installations concernées (cf. taxe additionnelle définie par l'article 43 modifié de la loi n° 99-1172 du 30 décembre 1999 de finances pour 2000, instaurée lors de la réforme de la taxe professionnelle).

5.1.1.2 **Les 25 milliards d'euros arrêtés par la Ministre de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie le 15 janvier 2016, retenus comme chiffrage de base de cette évaluation socioéconomique**

Dans l'optique de servir de référence au dimensionnement des provisions financières que doivent constituer les producteurs de déchets (EDF, le CEA et Orano) dans le cadre de la gestion à long terme des déchets radioactifs, un arrêté de 2016 (6) a fixé le coût afférent à la mise en place de Cigéo sur la période 2016-2156 à 25 milliards d'euros (aux conditions économiques du 31 décembre 2011). Selon l'article 2 : « Le coût fixé à l'article 1er est mis à jour régulièrement et *a minima* aux étapes clés du développement du projet (autorisation de création, mise en service, fin de la "phase industrielle pilote", réexamens de sûreté), conformément à l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire. »

L'arrêté de 2016 se base sur l'analyse par la DGEC du dossier de chiffrage de l'Andra présenté dans le chapitre précédent et des observations émises par les producteurs de déchets et par l'ASN. En particulier, le montant de 25 milliards d'euros provient du coût brut établi par l'Andra (33,8 milliards d'euros sur la période 2016-2156), dont sont retranchés plusieurs montants correspondant à l'intégration d'optimisations, notamment à très long terme, à la levée de certaines incertitudes et à une réduction de certains coûts (DGEC, 2016).

Cette prise en compte des optimisations explique ainsi pourquoi la valeur de 25 milliards d'euros retenue par l'arrêté diffère du coût estimé par l'Andra. Tout au long du projet, l'Andra « *s'attachera [...] à poursuivre sa démarche d'optimisation et de maîtrise des coûts tout en conservant l'exigence de sûreté comme priorité* » (Andra, 2015) afin d'atteindre l'objectif de coût. Ces optimisations, dont certaines sont déjà injectées, devront ainsi conduire à de nouvelles estimations du chiffrage de Cigéo, notamment à l'issue des études d'avant-projet détaillé. Ces valeurs mises à jour n'étant cependant pas encore disponibles au moment de la rédaction de ce rapport, une adaptation du chiffrage esquisse de l'Andra au coût arrêté par la Ministre (25 milliards d'euros) sera utilisée pour estimer les coûts du projet dans les différentes options et variantes.

Le chapitre suivant présente plus en détail la méthodologie utilisée dans le cadre de l'évaluation socioéconomique pour adapter le chiffrage esquisse réalisé par l'Andra aux 25 milliards d'euros arrêtés par la Ministre.

5.1.1.3 Adaptation du coût afférent réalisé par l'Andra en 2014 aux 25 milliards d'euros arrêtés par la Ministre

Afin de modéliser l'estimation des coûts du projet Cigéo pour l'ensemble des options d'investissement étudiées dans ce rapport, l'échéancier issu de l'évaluation des coûts afférents, réalisé par l'Andra en 2014 sur la base de l'esquisse, a été adapté au chiffrage arrêté par la Ministre en 2016. En effet, le coût arrêté de la DGEC n'est pas accompagné d'un échéancier. Dans cette optique, ce rapport réalise une conversion des coûts du projet Cigéo, tranche par tranche, poste par poste, puis année par année, afin de considérer les hypothèses du coût arrêté par la Ministre à 25 milliards d'euros : à savoir, la levée d'un certain nombre d'incertitudes et l'intégration d'optimisations intervenant à long terme. Ainsi, si les coûts de la tranche 1, dite T1, restent basés sur l'estimation de l'Andra, la levée de certaines incertitudes et l'intégration d'optimisations interviennent sur les coûts de la tranche ultérieure, dite TU⁴³.

De ce fait, le chiffrage de 2014 réalisé par l'Andra sert de base au travail de modélisation de cette évaluation socioéconomique, avec les aménagements suivants :

- les coûts intervenant entre les années 2012 et 2015, non considérés par le ministère dans le coût arrêté, sont échoués ;
- les coûts indiqués dans l'échéancier de la tranche 1 par l'Andra, sur la période 2016-2034, demeurent inchangés ;
- les coûts indiqués dans l'échéancier de la tranche ultérieure par l'Andra, sur la période 2035-2156, sont modifiés, selon un ratio proratisant le 25 milliards d'euros.

À ce stade, il n'est pas possible d'utiliser une méthode alternative pour adapter le coût afférent de l'Andra au coût arrêté par la Ministre. Un nouveau chiffrage détaillé réalisé par l'Andra et ventilé selon un échéancier des coûts du projet pourrait amener à définir une répartition des coûts différente ultérieurement.

5.1.1.4 Coût unitaire de mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1

Les hypothèses suivantes ont été posées pour passer au coût arrêté de 25 milliards d'euros :

- Pour la tranche 1 concernant l'ensemble des coûts entre 2016 et 2034, aucun changement n'a été effectué, soit 7 117 millions d'euros ;
- Pour la tranche ultérieure concernant l'ensemble des coûts entre 2035 et 2156, les coûts de la tranche 1 (7 117 millions d'euros) ont été retranchés de 25 milliards d'euros. On obtient ainsi 17 883 millions d'euros, soit 67 % du coût estimé par l'échéancier de l'Andra (26 738 millions d'euros) sur la période 2035-2156. On applique ensuite ce ratio à l'ensemble des lignes de coûts de Cigéo.

⁴³ L'année de passage de la tranche 1 (T1) à la tranche ultérieure (TU) est estimée à 2035. Elle correspond peu ou prou, dans la description du centre de stockage Cigéo faite dans le chapitre 2.4 et de l'option 1 faite dans le chapitre 4.3, au démarrage de la phase d'essais actifs.

Tableau 5.1 1 Coût esquisse et conversion vers le coût arrêté par la Ministre

Période concernée	Chiffrage esquisse de l'Andra (2014)	Objectif arrêté par la Ministre (2016) Période 2016-2156	Taux de conversion pour obtenir un échéancier prenant en compte les 25 milliards d'euros de la DGEC
2012 à 2015	656 M€ ₂₀₁₂	Coûts échoués	-
2016 à 2034	7 117 M€ ₂₀₁₂	7 117 M€ ₂₀₁₂	100 %
2035 à 2156	26 738 M€ ₂₀₁₂	17 883 M€ ₂₀₁₂	67 %
Total 2012-2156	34 511 M€₂₀₁₂	-	-
Total 2016-2156	33 855 M€₂₀₁₂	25 000 M€₂₀₁₂	-

Enfin, rappelons que l'évaluation socioéconomique se focalise sur les coûts et bénéfices à partir de sa date de réalisation en 2019⁴⁴. Par conséquent, les coûts compris entre 2016 et 2019 sont considérés comme échoués et les valeurs monétaires sont exprimées en euros 2019.

► NOTE IMPORTANTE

Dès lors, le coût brut total de Cigéo sur la période entre 2019 et 2156 comprenant la tranche 1 et la tranche ultérieure s'élève à **25 811 millions d'euros**₂₀₁₉. C'est le coût retenu pour l'option de projet 1.

5.1.1.5 Coût unitaire de mise en place de Cigéo dans les options 2, 3 et option 4

Les branches des options 2, 3 et 4 prévoient des modifications dans la mise en place de Cigéo. Hormis les branches 2.1.a et 2.2, pour lesquelles le déroulement envisagé reste identique à celui de l'option de projet 1, sept cas existent :

- Le premier cas correspond à la situation où les investissements commencent dès 2019, mais seuls les déchets MA-VL sont *in fine* stockés à partir de 2040 au sein de Cigéo ; les coûts se rapportant aux déchets HA sont retirés du calcul du coût de Cigéo. Ce cas de figure correspond à la branche 2.1.b de l'option 2, il suit un échéancier identique à celui de l'option de projet 1, mis à part pour les déchets HA de la phase de fonctionnement.
- Le deuxième cas correspond à la situation où les investissements commencent dès 2019, et seuls les déchets MA-VL sont *in fine* stockés à partir de 2070. Ce cas de figure correspond aux branches 3.1.c et 3.2.a. Dans l'arbre de l'option 3, le décideur doit attendre 2070 pour savoir si une technologie prospective est trouvée ou non ; la phase industrielle pilote est toutefois lancée dès 2030. Ainsi, les investissements sont identiques à ceux de l'option de projet 1 jusqu'en 2040. En 2040, les investissements sont suspendus, et seuls des coûts de jouvence, d'assurances, de fiscalité,

⁴⁴ Notons que les coûts échoués se basent sur la vision 2014 de l'échéancier de coût de Cigéo. Or certaines dépenses n'ont pas été effectuées, notamment sur des aménagements routiers, ferroviaires, maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage. Selon l'Andra, il y aurait environ 164 M€ qui n'auraient pas été dépensés par rapport à la vision 2014. Cette dépense étant marginale par rapport aux autres ordres de grandeur de l'évaluation socioéconomique et son montant précis, non connu, nous maintenons l'échéancier initial.

de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre sont maintenus. En 2070, le stockage des déchets MA-VL peut commencer.

- Le troisième cas correspond à la situation où les investissements commencent dès 2019, les investissements sont suspendus entre 2040 et 2070, et les déchets MA-VL et HA sont *in fine* stockés aux sein de Cigéo. Ce cas de figure correspond aux branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 de l'option 3. L'échéancier de coûts est identique à celui du deuxième cas jusqu'en 2070 ; la phase de fonctionnement pour les MA-VL commence également en 2070, et celle pour les déchets HA en 2080.
- Le quatrième cas correspond à la situation où les investissements commencent dès 2019, toutefois, ni les déchets MA-VL ni les déchets HA sont *in fine* stockés au sein de Cigéo. Ce cas de Figure correspond à la branche 3.1.a de l'option 3. L'échéancier de coûts est identique à celui du deuxième cas jusqu'en 2070 ; s'en suivent 10 ans de travail afin de retirer les déchets de la phase industrielle pilote, puis 10 ans de fermeture.
- Le cinquième cas correspond à la situation où aucun investissement n'est effectué jusqu'en 2070 ou 2100, année à partir de laquelle la décision est prise de mettre en œuvre Cigéo sur le site de Meuse/Haute-Marne ou sur un site alternatif. Il correspond ainsi aux branches 4.1.a, 4.3.a, 4.6 et 4.7 de l'option 4. Ainsi, la phase de fonctionnement pour les déchets HA et MA-VL est lancée de manière concomitante, et la durée totale de fonctionnement est réduite de 105 à 65 ans. Les déchets HA sont toujours stockés sur une durée de 65 ans, et les déchets MA-VL sur une durée de 60 ans.
- Le sixième cas correspond à la situation où aucun investissement n'est effectué jusqu'en 2070, année à partir de laquelle la décision est prise de mettre en œuvre Cigéo sur le site de Meuse/Haute-Marne pour les déchets HA uniquement. Il correspond à la branche 4.1.b de l'option 4.
- Le septième cas correspond à la situation où aucun investissement n'est effectué jusqu'en 2070 ou 2100, année à partir de laquelle la décision est prise de mettre en œuvre Cigéo sur le site de Meuse/Haute-Marne ou sur un site alternatif pour les déchets MA-VL uniquement. Il correspond ainsi aux branches 4.1.c, 4.3.b et 4.4 de l'option 4. On note que ce cas diffère du deuxième cas dans la mesure où aucune suspension d'investissement n'est effectuée (la phase de fonctionnement pour les déchets MA-VL suit directement la phase industrielle pilote). Il diffère du premier cas dans la mesure où les déchets HA ne sont pas considérés comme une famille de déchets à stocker, et ce dès le lancement de l'investissement ; cela réduit le coût brut très marginalement en supprimant une catégorie d'investissement (le process HA).

Le tableau ci-dessous indique les coûts unitaires de mise en place de Cigéo selon ces différentes configurations.

Tableau 5.1-1 Coûts unitaires de mise en place de Cigéo dans les différentes branches des options 2, 3 et 4

Cas (branche)	Description	Coût
Cas de base (2.1.a et 2.2)	Déroulement identique à celui de l'option de projet 1	25 811 M€
Cas 1 (2.1.b)	Investissement à partir de 2019, MA-VL uniquement à Cigéo, fonctionnement à partir de 2040	15 110 M€
Cas 2 (3.1.c et 3.2.a)	Investissement à partir de 2019, MA-VL uniquement à Cigéo, fonctionnement à partir de 2070	16 813 M€
Cas 3 (3.1.b, 3.2.b et 3.3.)	Investissement à partir de 2019, HA et MA-VL à Cigéo, fonctionnement à partir de 2070	26 737 M€
Cas 4 (3.1.a)	Investissement à partir de 2019, ni HA ni MA-VL à Cigéo	10 571 M€
Cas 5	Investissement à partir de 2070 ou 2100, HA et MA-VL à Cigéo	25 518 M€

Cas (branche)	Description	Coût
(4.1.a, 4.3.a, 4.6 et 4.7)		
Cas 6 (4.1.b)	Investissement à partir de 2070, HA uniquement à Cigéo	16 183 M€
Cas 7 (4.1.c, 4.3.b et 4.4)	Investissement à partir de 2070 ou 2100, MA-VL uniquement à Cigéo	14 909 M€

5.1.1.6 Évolution des prix relatifs

La prise en compte de l'évolution des prix relatifs nous permet d'étudier la variation du coût des biens étudiés par rapport à l'évolution au reste de la consommation.

Afin d'étudier cette évolution, il convient d'étudier chaque composante du coût de mise en place de Cigéo :

Les coûts liés à l'investissement et au fonctionnement et, de façon indirecte, les dépenses de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage, de fiscalité et d'assurance sont assimilés à des flux de type génie civil. Pour rappel, les élasticités au PIB des dépenses assimilées au génie civil, définies au chapitre 3.2.3.2 du présent document, sont les suivantes :

- Pour le scénario OK :
 - ✓ jusqu'en 2070, l'élasticité est de 1,5 pour l'hypothèse haute, 0,8 pour l'hypothèse intermédiaire et 0,1 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ entre 2070 et 2170, une décroissance linéaire vers 0,3 pour l'hypothèse haute et vers 0,2 pour l'hypothèse intermédiaire ; un maintien de l'élasticité à 0,1 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ Après 2170, un maintien des élasticités à leur valeur de 2170, soit 0,3 pour l'hypothèse haute, 0,2 pour l'hypothèse intermédiaire et 0,1 pour l'hypothèse basse.
- Pour le scénario KO :
 - ✓ en 2019, l'élasticité est de 1,5 pour l'hypothèse haute, 0,8 pour l'hypothèse intermédiaire et 0,1 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ entre 2019 et 2100, une décroissance linéaire vers 0,3 pour l'hypothèse haute et vers 0,2 pour l'hypothèse intermédiaire ; un maintien de l'élasticité à 0,1 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ après 2100, un maintien des élasticités à leur valeur de 2100, soit 0,3 pour l'hypothèse haute, 0,2 pour l'hypothèse intermédiaire et 0,1 pour l'hypothèse basse.

Les coûts liés aux dépenses sous maîtrise d'ouvrage Andra, qui regroupent des dépenses de recherche sur site (comportant notamment, les dépenses de fonctionnement du laboratoire souterrain), de communication et d'insertion territoriale sont assimilés à des flux de type recherche et maintien des compétences.

Pour rappel, les élasticités au PIB des dépenses assimilés à la recherche et au maintien des compétences, définies au chapitre 3.2.3.2 du présent document, sont les suivantes :

- Pour le scénario OK :
 - ✓ jusqu'en 2070, l'élasticité est de 1 pour l'hypothèse haute, 0,5 pour l'hypothèse intermédiaire et 0 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ entre 2070 et 2170, une décroissance linéaire vers 0,1 pour l'hypothèse haute et vers 0,05 pour l'hypothèse intermédiaire ; un maintien de l'élasticité à 0 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ après 2170, un maintien des élasticités à leur valeur de 2170, soit 0,1 pour l'hypothèse haute, 0,05 pour l'hypothèse intermédiaire et 0 pour l'hypothèse basse.

- Pour le scénario KO :
 - ✓ en 2019, l'élasticité est de 1 pour l'hypothèse haute, 0,5 pour l'hypothèse intermédiaire et 0 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ entre 2019 et 2100, une décroissance linéaire vers 0,1 pour l'hypothèse haute et vers 0,05 pour l'hypothèse intermédiaire ; un maintien de l'élasticité à 0 pour l'hypothèse basse ;
 - ✓ après 2100, un maintien des élasticités à leur valeur de 2100, soit 0,1 pour l'hypothèse haute, 0,05 pour l'hypothèse intermédiaire et 0 pour l'hypothèse basse.

5.1.2 Coût de R&D

5.1.2.1 Coût unitaire

Le coût unitaire de recherche et développement (R&D) intervient dans les options 2, 3 et 4, lorsqu'une recherche prospective visant à trouver une technologie de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL est engagée.

S'agissant de l'estimation de ce coût unitaire de R&D, des hypothèses ont dû être réalisées pour déterminer un montant crédible. Un investissement de 70 millions d'euros par an et par type de déchets (HA ou MA-VL) entre 2019 et 2070 a été retenu dans le cadre de cette évaluation.

Cette valeur s'appuie sur le fait qu'en France, les activités de recherche réalisées dans le cadre de la loi « Bataille » entre 1991 et 2006 sur les 3 axes de recherche (cf. chapitre 2.3 : séparation/transmutation, stockage géologique profond et entreposage de longue durée) ont donné lieu à 2,5 milliards d'euros de dépenses, soit 55 millions d'euros par an et par axe. Par conséquent, du fait de l'inflation, une valeur de référence de 70 millions d'euros par an de R&D est prise pour trouver une technologie prospective et s'assurer que celle-ci soit compatible avec les règles fondamentales de sûreté.

Ainsi, dans un souci de simplification, le coût unitaire de la R&D de 70 millions d'euros par an est retenu dans l'option 2, lorsque l'effort de recherche est limité aux seuls déchets HA, même si ce choix est vraisemblablement conservateur. Dans les options 3 et 4, lorsque l'effort de recherche est appliqué pour trouver des technologies prospectives à la fois pour les déchets HA et pour les déchets MA-VL, 140 millions d'euros sont investis chaque année, dès 2019 et jusqu'en 2070. Cette hypothèse se veut schématique. À défaut d'hypothèse d'évolution de ce genre de dépense dans le temps, celle-ci est considérée constante sur la période 2019-2070.

5.1.2.2 Évolution des prix relatifs

Les dépenses de R&D sont assimilées à des flux de type recherche et maintien des compétences.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.3 Coût de recherche de site

5.1.3.1 Rappel des circonstances possibles de recherche d'un site

Le coût unitaire de recherche de site intervient dans deux situations distinctes :

- Lorsque la R&D a permis d'identifier une technologie prospective de mise en sécurité définitive au moins aussi sûre que le stockage en couche géologique profonde et qu'il s'agit de trouver un site d'implantation adapté à cette technologie pour qualifier la R&D de fructueuse (possiblement dans les options 2, 3 et 4) ;

- Lorsque le site actuel de Meuse/Haute-Marne est perdu et qu'il est nécessaire de rechercher un nouveau site d'implantation pour le stockage géologique profond. Cette configuration correspond à certaines des branches de l'option 4, où le décideur public considère un report des premiers investissements du centre de stockage Cigéo (ni construction initiale du centre de stockage Cigéo ni de phase industrielle pilote) et lance à la place des investissements de R&D et s'expose de fait au risque de perdre le site de Meuse/Haute-Marne. Une fois la période de R&D terminée en 2070, dans le cas où celle-ci serait infructueuse et où le site de Meuse/Haute-Marne serait perdu, une nouvelle recherche de site pour implanter un stockage géologique profond est lancée.

Pour estimer ces coûts de recherche de site d'implantation, le chapitre 5.1.3.2 propose un retour d'expérience de plus de 30 ans concernant la recherche de site qui a abouti au site actuel de Meuse/Haute-Marne. Sur la base de données chiffrées de ce retour d'expérience, une estimation du coût de recherche de site pour une technologie prospective est avancée (cf. chapitre 5.1.3.3 du présent document), ainsi qu'une estimation du coût de recherche d'un nouveau site pour un stockage géologique profond (cf. chapitre 5.1.3.4 du présent document).

5.1.3.2 Retour d'expérience de la recherche du site actuel de Meuse/Haute-Marne

Historiquement, après une dernière campagne d'immersion sous-marine de déchets radioactifs⁴⁵ en 1969, les recherches techniques et de sites liées à la solution de stockage géologique profond ont débuté en France dans les années 1970. Les informations sur cette première période sont difficiles d'accès et leur extrapolation à une nouvelle recherche de site s'avère complexe et limitée. Elles deviennent plus clairement identifiables à partir de 1992, à la date de promulgation de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dite loi « Bataille » (22).

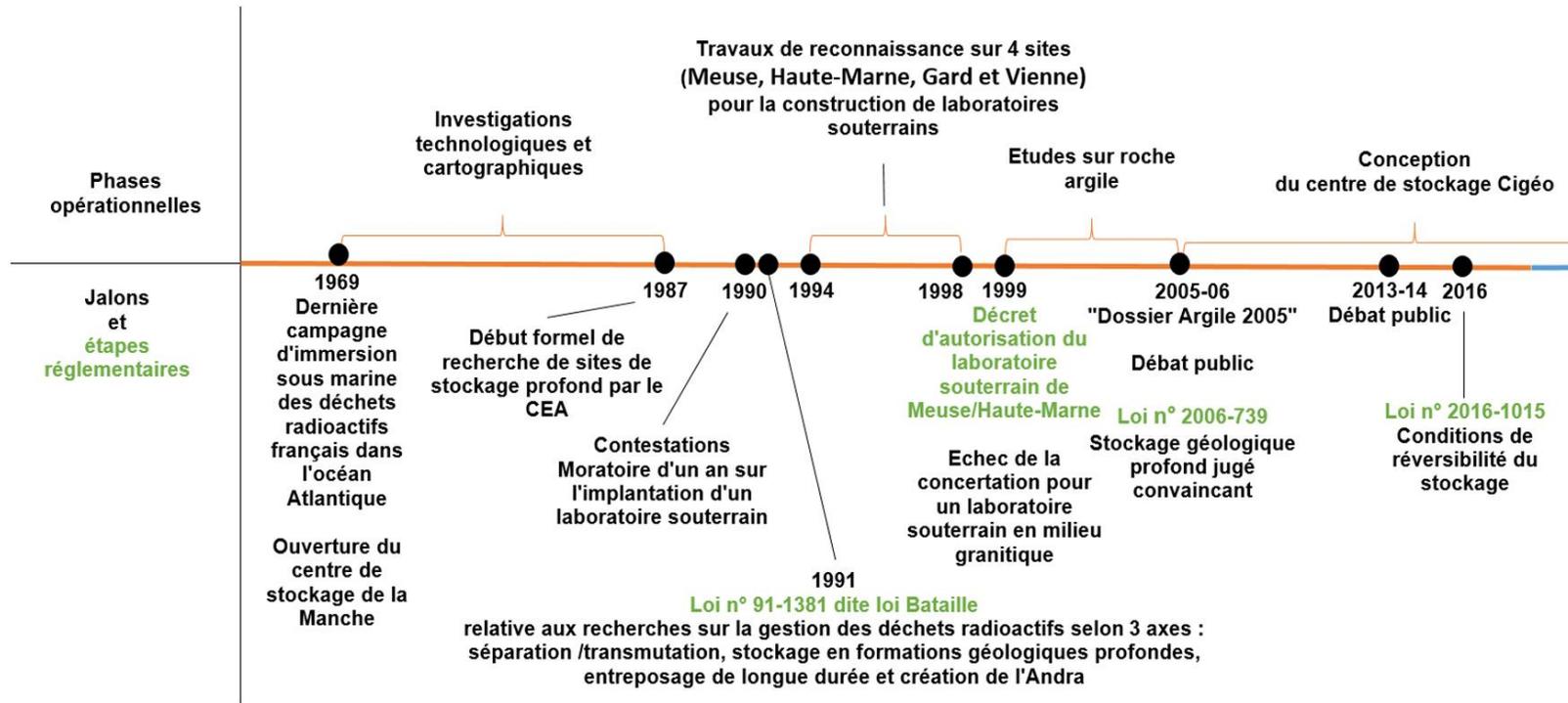
Le décret d'autorisation de création marquera la sécurisation complète du site d'implantation et de la solution proposée ; il est donc retenu dans cette évaluation pour marquer l'aboutissement des recherches de site pour l'actuel projet de centre de stockage Cigéo.

Les principaux acteurs impliqués dans la recherche et la sécurisation de site sont :

- l'Andra (et auparavant le CEA), qui articule les recherches, organise les études permettant de recueillir les éléments de justification et de démonstration, et accompagne le processus de sélection des sites jusqu'au choix d'implantation ;
- les organismes chargés d'évaluer, d'instruire et de rendre un avis sur les questions relatives à la sûreté nucléaire (CNE, IRSN, et l'autorité de contrôle ASN) ;
- l'État, qui décide de l'approbation ;
- et les Groupements d'intérêts publics (GIP), qui veillent à l'accompagnement économique du territoire sur le site d'implantation.

La frise ci-dessous décrit le calendrier de recherche de site.

⁴⁵ À noter que ces immersions n'ont pas concerné de déchets HA ou MA-VL.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0028-B

Figure 5.1-1 Historique des éléments constitutifs de la recherche et la sécurisation du site de Meuse/Haute-Marne

Selon le retour d'expérience, le coût de recherche du site de Meuse/Haute-Marne s'établit sur la base du récapitulatif des dépenses déjà engagées (1983-2019) et des dépenses futures à engager (2020-2025). La fin de cette période de retour d'expérience est calée par l'obtention du décret d'autorisation de création, autorisant le démarrage des travaux de construction initiale, et concrétisant le choix du site de stockage géologique profond :

- **Dépenses déjà engagées :**

Les coûts liés au site de Meuse/Haute-Marne sur la période 1983-2019 peuvent être segmentés en plusieurs catégories :

- ✓ les **dépenses courantes antérieures à la loi de 1991** concernent des investigations technologiques et géographiques menées par le CEA, puis par l'Andra, entre 1983 et 1991. Il s'agit de dépenses de recherches sur la technologie de stockage en couche géologique profonde et de dépenses de recherche sur l'implantation de ce stockage. Les dépenses engagées sur cette période atteignent 234 millions d'euros₂₀₁₉.
- ✓ les **recherches géologiques et de construction d'un laboratoire souterrain**, entre 1992 et 2006. Les opérations menées par l'Andra sur cette période relativement longue de quinze ans se composent :
 - des « études scientifiques, d'ingénierie et évaluation de sûreté » ;
 - des « travaux de reconnaissance sur 4 sites : Meuse, Haute-Marne, Gard et Vienne » à partir de 1994 ;
 - des « études sur les roches granitiques » entre 1999 et 2006 ;
 - et de la construction et utilisation du « Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne » à partir de 1999.

En raison de l'absence d'indications concernant l'étalement précis de dépenses correspondant à chaque opération, celles-ci sont comptabilisées en un seul poste de dépense, dont le total atteint plus de 1,2 milliard d'euros₂₀₁₉.

- ✓ les **recherches appliquées à Cigéo**⁴⁶, entre 2007 et 2019 : les dépenses de ce poste font référence à des opérations de démonstration de la faisabilité du stockage profond (Dossier 2005 de l'Andra), puis de caractérisation du site et de choix d'implantation de 2007 à 2012, avant de préciser le contour du projet Cigéo dans les études d'esquisse (2013) et d'avant-projet jusqu'en 2020, ainsi que la réalisation de démonstrateurs. Ce poste de dépenses atteint plus de 1,2 milliard d'euros₂₀₁₉.
- ✓ la **conception de Cigéo**, entre 2007 et 2019 : ce poste, de 693 millions d'euros₂₀₁₉, fait référence aux coûts inhérents à la conception de la solution pérenne de stockage géologique profond sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne. Il comprend également les dépenses liées à la préparation et à l'instruction des dossiers réglementaires d'autorisation.
- ✓ l'**accompagnement économique** entre 1994 et 2000 concerne les 4 départements candidats jusqu'en 1999 environ, puis seulement la Haute-Marne et la Meuse ensuite. Il atteint près de 30 millions d'euros₂₀₁₉.
- ✓ le **repli des sites non sélectionnés**, entre 1999 et 2000 : ces dépenses de plus de 6 millions d'euros₂₀₁₉ font référence aux coûts de dédommagement suite au retrait des sites (Gard et Vienne), du fait de la démobilisation des personnels, l'indemnisation des prestataires, etc. ;
- ✓ les **groupements d'intérêts publics (GIP)**⁴⁷, entre 2000 et 2019, concernant à la fois le GIP Objectif Meuse et le GIP Haute-Marne. L'accompagnement économique attribué par les groupements d'intérêts publics aux acteurs sur le territoire concernent essentiellement les subventions aux communes les plus proches (distance inférieure à 10 km) et les subventions ou prêts attribués à des porteurs de projets publics ou privés. Le coût des groupements d'intérêts publics est estimé à 812 millions d'euros sur la période 2000-2019.

⁴⁶ Cf. les rapports financiers de l'Andra disponibles pour chaque année sur https://www.andra.fr/publications?f%5B0%5D=facet_doc_cat%3A224, sous le compte « fonds recherche » (68).

⁴⁷ Cf. les rapports d'activités du GIP Objectif Meuse disponibles pour chaque année sur <https://www.objectifmeuse.org/documents-telechargeables/> (69) et les comptes financiers du GIP Haute-Marne, annexés aux procès-verbaux des assemblées générales disponibles pour chaque année sur <https://www.gip-haute-marne.fr/documents.html> (70).

- Dépenses futures à engager :

Les dépenses futures à engager sont considérées à partir de 2020. Elles interviennent jusqu'à la concrétisation du choix du site de stockage géologique profond, représentée par l'obtention du décret d'autorisation de création, préalable au démarrage des travaux de construction initiale. Il convient donc de projeter les coûts à venir, jusqu'en 2025.

Nous supposons que les postes suivants sont concernés :

- ✓ les **recherches appliquées à Cigéo** : le montant des dépenses est estimé à 444 millions d'euros, par régression linéaire, sur la période 2020 à 2025 ;
- ✓ la **conception de Cigéo** : le montant des dépenses est estimé à 1 163 millions d'euros, par régression linéaire, sur la période 2020 à 2025 ;
- ✓ les **groupements d'intérêts publics** : l'hypothèse est ici posée de poursuite du montant alloué à chacun des deux groupements d'intérêts publics (GIP Objectif Meuse et GIP Haute-Marne) correspondant à une dépense annuelle de 30 millions d'euros par groupement d'intérêt public entre 2019 et 2025. Le chapitre 5.1.8 fournit des précisions sur ce que contiennent les GIP.

Le tableau ci-après détaille les différentes catégories du coût de recherche du site actuel de stockage géologique profond, des premières investigations à l'obtention du décret d'autorisation de création :

Tableau 5.1-2 Estimation du coût de recherche du site actuel de stockage géologique profond, des premières investigations à l'obtention du décret d'autorisation de création

Catégories de coûts	Dépenses déjà engagées (1983-2019)	Dépenses à engager (2020-2025)	Montant total (1983-2025)
Dépenses courantes antérieures à la loi de 1991	234 M€	-	234 M€
Recherches géologiques et de construction d'un laboratoire souterrain	1 270 M€	-	1 270 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds recherche)	1 281 M€	444 M€	1 725 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds conception)	693 M€	1 163 M€	1 856 M€
Accompagnement économique avant les GIP	30 M€	-	30 M€
Repli des sites non-sélectionnés	6 M€	-	6 M€
Groupements d'intérêts publics	812 M€	360 M€	1 172 M€
Total	4 326 M€	1 967 M€	6 293 M€

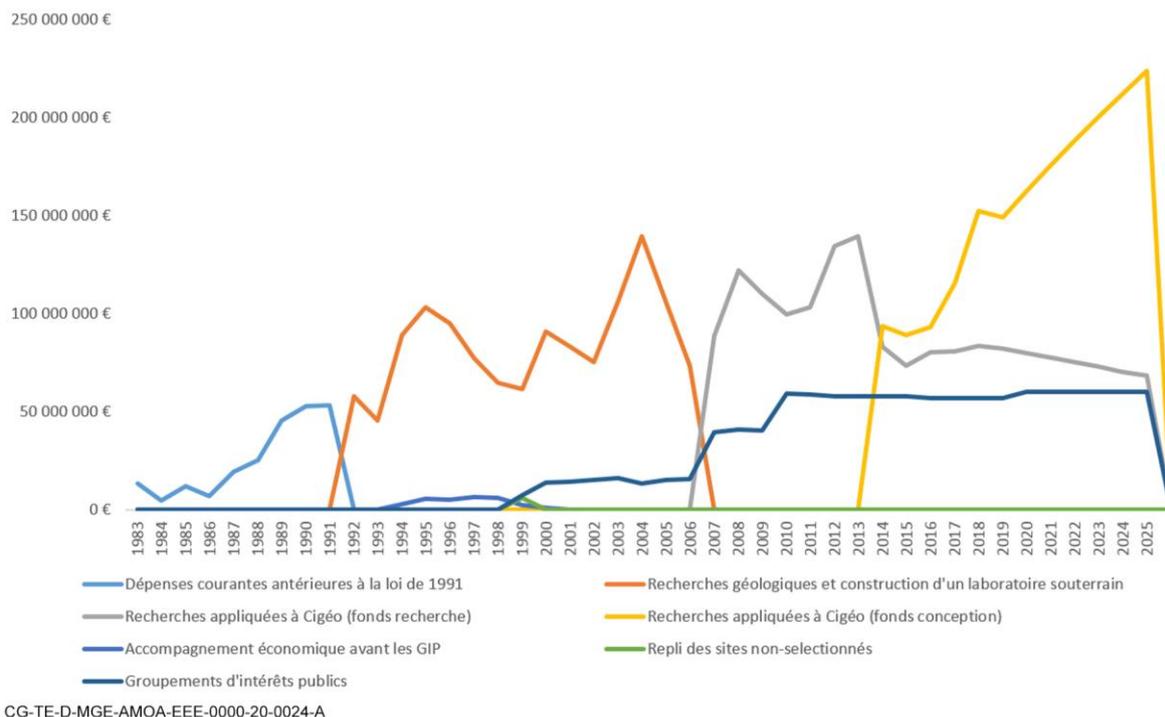


Figure 5.1-2 Historique et projection des coûts de recherche de site pour le site de Meuse/Haute-Marne

► NOTE IMPORTANTE

Selon le retour d'expérience établi, l'estimation du coût de recherche du site actuel de Meuse/Haute-Marne s'élève à un montant de 6 293 millions d'euro₂₀₁₉, sur une période de plus de quarante ans, entre 1983 et 2025.

5.1.3.3 Coût de recherche de site pour une technologie prospective

Le coût de recherche de site pour une technologie prospective se base sur le retour d'expérience du site actuel de Meuse/Haute-Marne dans le cadre du stockage géologique profond.

Afin d'adapter au mieux cette estimation au cas d'une technologie prospective, nous segmentons cette recherche en deux phases, selon la frise présentée dans la Figure 5.1-1 :

- **La phase 1** correspond à la période initiale, comprise entre 1983 et 2006, depuis les premières investigations jusqu'à la loi relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Cette phase est représentative des efforts de recherche nécessaires pour disposer d'un site et d'un laboratoire souterrain dédié à l'étude des caractéristiques géologiques et des moyens technologiques de qualification des travaux souterrains. Ainsi, cette phase inclut les investigations préliminaires technologiques et cartographiques, les premières et secondes recherches de site par le CEA, puis par l'Andra, ainsi que la construction et le début du fonctionnement du laboratoire souterrain ;
- **La phase 2** correspond à la période entre 2007 et 2025, depuis que le laboratoire souterrain est achevé et jusqu'au décret d'autorisation de création. Cette phase est représentative des investigations approfondies nécessaires à la conception des installations de stockage géologique profond sur son site d'implantation. Les dépenses considérées comprennent les coûts de

fonctionnement du laboratoire souterrain, de conception des installations et d'accompagnement économique des territoires par les groupements d'intérêts publics.

Le tableau ci-après reprend les différentes catégories du coût de recherche du site actuel de Meuse/Haute-Marne prévu pour le stockage géologique profond, des premières investigations jusqu'à l'obtention du décret d'autorisation de création, et distingue des dépenses selon les phases :

Tableau 5.1-3 Estimation du coût de recherche du site de Meuse/Haute-Marne, des premières investigations à l'obtention du décret d'autorisation de création

Catégories de coûts	Phase 1 (1983-2006)	Phase 2 (2007-2025)	Montant total (1983-2025)
Dépenses courantes antérieures à la loi de 1991	234 M€	-	234 M€
Recherches géologiques et de construction d'un laboratoire souterrain	1 270 M€	-	1 270 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds recherche)	-	1 725 M€	1 725 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds conception)	-	1 856 M€	1 856 M€
Accompagnement économique avant les GIP	30 M€	-	30 M€
Repli des sites non-sélectionnés	6 M€	-	6 M€
Groupements d'intérêts publics	112 M€	1 060 M€	1 172 M€
Total	1 652 M€	4 641 M€	6 293 M€

Afin d'adapter l'estimation du coût de recherche de site du cas du stockage géologique profond à celui d'une technologie prospective, nous posons l'hypothèse d'un taux de récurrence de 100 % du coût de recherche de site, soit un coût total d'environ 6 293 millions d'euros. Ce taux de récurrence signifie que toutes les opérations conduites dans le cas de la recherche de site pour le stockage géologique profond, le seront également dans le cas de la recherche d'un site d'implantation pour une technologie prospective.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût de recherche de site pour une technologie prospective est estimé selon le retour d'expérience du site actuel de stockage géologique profond et s'établit à un montant de 6 293 millions d'euros²⁰¹⁹, correspondant à 1 652 millions d'euros pour la phase 1 et 4 641 millions d'euros pour la phase 2.

Dans la modélisation des options, nous posons l'hypothèse que les dépenses de la première phase de recherche de site (correspondant aux dépenses nécessaires pour identifier et disposer d'un site, ainsi que de la mise en place d'un laboratoire souterrain) sont engagées en même temps que les dépenses de R&D fondamentale pour trouver cette même technologie. La deuxième phase (de recherche approfondie sur site) n'est engagée qu'une fois un site identifié et la décision de mise en œuvre d'une technologie prospective actée, soit en 2070 pour la plupart des branches des options étudiées.

Pour rappel, dans le cas des déchets HA, la technologie prospective envisagée est une technologie de type forage profond, dont les contours techniques sont déjà définis (cf. chapitre 4.1.3 du présent

document). Le lancement d'une recherche de site (notamment cartographique) à très court-terme simultanément avec la R&D ne paraît donc pas aberrant. Pour rappel, la recherche de site dans le cas du stockage géologique profond a commencé dès le début des années 1980.

Dans le cas des déchets MA-VL, la technologie prospective envisagée est un processus de densification préalable au stockage par forage profond. Nous posons l'hypothèse qu'une seule recherche est effectuée pour la mise en place du forage pour les déchets HA et MA-VL. Implicitement, nous avons donc fait l'hypothèse que les HA et MA-VL seraient stockés dans un même site en s'appuyant sur des forages profonds et que la densification des MA-VL serait effectuée sur le site, en surface, ce qui évite des transports. Une sensibilité des résultats à une modification de ce coût est réalisée, *via* les simulations de Monte-Carlo.

5.1.3.4 Coût de recherche d'un nouveau site pour le stockage géologique profond

L'intérêt d'établir le retour d'expérience du site actuel de Meuse/Haute-Marne réside également dans l'extrapolation que l'on peut en faire pour estimer le coût de recherche d'un nouveau site de stockage en couche géologique profonde. Cette situation de perte du site actuel, intervient dans l'option 4, au sein des branches 4.4, 4.5, 4.7 et 4.8.

Selon le retour d'expérience, la phase 1, qui couvre la période d'investigations préliminaires nécessaires au choix d'implantation de site, incluant la construction d'un laboratoire souterrain, s'élève à un montant de 1 652 millions d'euros.

La phase 2 couvre la période d'investigations approfondies nécessaire à la conception des installations de stockage géologique profond sur son site d'implantation. Le montant des dépenses de cette phase 2 s'élève à un montant de 4 641 millions d'euros.

L'extrapolation de ce retour d'expérience vers les coûts de recherche d'un nouveau site de stockage géologique profond nécessite de discuter de la récurrence des dépenses. Plusieurs arguments militent en faveur d'un taux de récurrence élevé, pour les motifs suivants :

- la difficulté de trouver un site pour gérer des déchets radioactifs, tant en terme de conditions géologiques favorables que d'acceptabilité locale (cf. les difficultés récentes pour trouver un site pour les déchets FA-VL) ;
- la nécessité probable d'exploiter un deuxième laboratoire souterrain, en plus du laboratoire souterrain actuel ;
- la nécessité de refaire l'ensemble des études techniques et scientifiques sur un nouveau site.

Le taux de récurrence des dépenses hors accompagnement et GIP est estimé à 80 %, en raison d'éventuelles économies d'échelle qui pourraient être réalisées. Ne pas postuler une récurrence de 100 % sur l'ensemble des postes de dépenses permet de ne pas rendre artificiellement coûteuses certaines branches de l'option 4. Les coûts supplémentaires liés à l'accroissement des normes sont pris en compte par le biais des prix relatifs.

Par ailleurs, en cas de besoin de recherche d'un nouveau site de stockage géologique profond, pour éviter un double compte, on ne tiendra pas compte des dépenses de recherche (fonds recherche et conception) entre 2020 et 2025, puisque celles-ci sont déjà prises en compte dans les coûts de mise en place de Cigéo (cf. catégorie « coûts sous maîtrise d'ouvrage Andra »).

Tableau 5.1-4 Extrapolation du coût de recherche d'un nouveau site pour le stockage géologique profond

Catégories de coûts	Phase 1 (1983-2006)	Phase 2 (2007-2025)	Montant total (1983-2025)
Dépenses courantes antérieures à la loi de 1991	187 M€	-	187 M€
Recherches géologiques et de construction d'un laboratoire souterrain	1 016 M€	-	1 016 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds recherche)	-	1 024 M€	1 024 M€
Recherches appliquée à Cigéo (fonds conception)	-	554 M€	554 M€
Accompagnement économique avant les GIP	30 M€	-	30 M€
Repli des sites non-sélectionnés	5 M€	-	5 M€
Groupements d'intérêts publics	112 M€	1 060 M€	1 172 M€
Total	1 350 M€	2 638 M€	3 988 M€

► NOTE IMPORTANTE

Le coût brut de recherche d'un nouveau site de stockage géologique profond est ainsi estimé à près de 4 milliards d'euros₂₀₁₉.

Comme pour le cas de la recherche d'un site pour une technologie prospective, la phase 1 de recherche de site est lancée en premier, dès le choix du décideur d'engager des efforts de recherche pour l'identification d'un nouveau site ; la phase 2 de recherche approfondie sur site n'est engagée que dans le cas où un site est identifié.

5.1.3.5 Évolution des prix relatifs

Le coût de recherche d'un nouveau site est assimilé à des flux de type recherche et maintien des compétences.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.4 Coût d'une technologie prospective pour les déchets HA

5.1.4.1 Coût unitaire

Le coût unitaire d'une technologie prospective désigne le coût de la mise en place de cette technologie prospective, comprenant des phases d'essais, de fonctionnement et de démantèlement.

Dans les différentes options de cette évaluation socioéconomique, ce coût unitaire s'articule avec le coût unitaire de la R&D et le coût unitaire de recherche de site, afin de modéliser au mieux le processus de mise en place d'un choix de gestion de mise en sécurité définitive.

Afin d'estimer le coût unitaire de cette technologie prospective, il est nécessaire de l'illustrer par un choix conventionnel visant à répondre aux besoins de l'évaluation socioéconomique. Il s'agit du forage profond, technologie prospective également connue sous le nom anglais de *deep borehole*⁴⁸. Il est important de souligner que ce choix conventionnel ne laisse pas présager d'une réouverture des choix possibles, compte tenu du moment de réalisation de cette évaluation socioéconomique par rapport à l'ensemble du processus légal entourant le choix de réaliser le centre de stockage Cigéo.

Par ailleurs, si le chiffrage du coût de la technologie illustrative est réalisé sur la base d'une documentation publique internationale, la maturité industrielle de la technologie considérée reste prospective et ancrée à un stade théorique. Il en a été de même dans le contexte français pour la technologie de stockage en couche géologique profonde, pour laquelle un fort investissement de recherche (études approfondies au contexte français de type études de faisabilité, études de développement industriel, mise en place d'un laboratoire souterrain de caractérisation) a été nécessaire pour dépasser ce stade théorique et atteindre un stade ultérieur d'application et de démonstration.

L'estimation faite dans cette évaluation socioéconomique se base sur la thèse d'Allen Bates (65), soutenue en 2015 au Massachusetts Institute of Technology. Allen Bates décrit « spent nuclear fuel (SNF) is isolated at depths of several kilometers in basement rock ». Le principe de cette technologie de forage profond est donc de stocker des encapsulations d'assemblages de combustibles usés dans un puit vertical de très grande profondeur, de l'ordre de 3 à 5 kilomètres, afin de positionner les déchets dans la partie inférieure du puit, au niveau du socle cristallin.

Selon Bates, l'estimation du coût de forage profond concerne ainsi des encapsulations d'assemblages de combustibles usés, et non des déchets vitrifiés comme dans le cas français, et repose sur :

- les coûts de caractérisation de site : cartographie de la structure géologique de grande profondeur, relevé sismique, propriétés hydrauliques et mécaniques, etc. Ces coûts sont distincts des coûts de recherche de site pour une technologie prospective (cf. chapitre 5.1.3.3 du présent document), qui n'intègrent pas la caractérisation géologique du forage profond à plusieurs kilomètres de profondeur.
- les coûts de forage des puits verticaux ;
- les coûts de mise en forage : descente des déchets dans le forage profond.

Le coût intermédiaire estimé par Bates est d'environ 135 \$/kg HM (kilogram of heavy metal, soit en français, kilogramme de métal lourd : kg ML), soit 136 €/kg ML.

Tableau 5.1-5 Estimation du coût du forage profond aux États-Unis d'Amérique

Coût estimé par Bates	En \$2012 par kg ML	En € 2019 par kg ML ⁴⁹
Fourchette haute	190,6 \$	192,9 €
Fourchette intermédiaire	134,7 \$	136,3 €
Fourchette basse	44,5 \$	45,0 €

⁴⁸ Voir le chapitre 2 pour une discussion des technologies alternatives envisagées par le passé et à l'étranger. Voir le chapitre 4 pour l'explication du choix de forage profond comme technologie prospective pour les déchets HA et de densification puis de mise en forage profond pour les déchets MA-VL, qui sont des choix conventionnels visant à répondre à l'évaluation socioéconomique, mais qui ne laissent pas présager d'une réouverture des choix possibles.

⁴⁹ Taux de change 2012 \$/€ de 0,94 et inflation cumulée 2012 / 2019 de 7,7 % (Insee), soit un coefficient d'évolution \$2012/€2019 de 1,012.

L'utilisation de la fourchette intermédiaire dans cette évaluation socioéconomique se veut conservatrice et prudente. En effet différents éléments auraient pu militer pour l'estimation d'un coût supérieur :

- Les importantes variations de coût entre un premier forage exploratoire et une technique de forage industrialisée, ne sont pas prises en compte ici ;
- La complexité technologique d'un forage augmentant avec le diamètre, le coût volumique de la technologie prospective de forage profond va croître avec le diamètre utilisé (en tenant compte non seulement de la partie utile du forage située dans la partie inférieure, mais aussi de la partie supérieure non utilisée pour le stockage). Alors que l'étude de Bates considère des encapsulations d'assemblages de combustibles usés de faible diamètre (0,3 mètre), les colis de déchets HA ont des diamètres deux fois plus élevés, influant directement sur le diamètre des puits qui seraient à considérer ;
- Enfin, si les coûts de Bates sont étayés, ils sont emprunts de fortes incertitudes en raison de l'absence de démonstrateur industriel.

D'un autre côté, il est rappelé que les 70 années de R&D prévues dans les options 2, 3 et 4 avant de décider le cas échéant de mettre en place la technologie prospective, ont bien pour objectif de résoudre les incertitudes et de répondre aux problématiques technologiques.

La fourchette intermédiaire de coût étant retenue, il convient de convertir, dans la mesure du possible, le coût du forage pour le stockage des combustibles usés américains en un coût de forage pour les déchets vitrifiés français. Pour ce faire, nous avons considéré comme caractéristique dimensionnante, l'inventaire radiologique (ou terme source) des produits de fission et d'actinides mineurs produits lors de l'utilisation des combustibles nucléaires dans les réacteurs. Nous avons fait l'hypothèse que ce terme source est invariant entre le combustible usé en sortie de réacteur et les déchets vitrifiés produits lors du retraitement du combustible usé. À titre illustratif, selon le rapport du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire portant sur la « Présentation du « cycle du combustible » français en 2018 » (71), il est précisé que le traitement de 1 080 tonnes de métaux lourds de combustible usé produit 826 colis primaires HA (de type CSD-V⁵⁰) pour un volume correspondant à 147 m³.

Par conséquent, pour un volume de 10 045 m³ de déchets HA indiqué dans l'inventaire de référence (selon le PIGD version E), le volume français correspond à la valeur arrondie de 74 000 tonnes de métaux lourds de combustible usé.

L'estimation du coût forage profond en France pour tous les déchets HA (à savoir HA et HA0) est indiquée ci-après dans le Tableau 5.1-6 :

Tableau 5.1-6 Estimation du coût de forage profond en France pour tous les déchets HA

Catégorie	Unité	Montant total
Coût estimé par Bates (fourchette intermédiaire)	En euros ₂₀₁₉ par tonne de métaux lourds	136,3 €/t ML
Volume de métaux lourds de combustible usé compris dans l'inventaire de référence de déchets HA	En tonnes	74 000 t
Estimation du coût de forage profond pour tous les déchets HA		

⁵⁰ La famille CSD-V de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs concerne les conteneurs standards de déchets vitrifiés en acier inoxydable dans lesquels sont conditionnées les solutions de produits de fission et d'actinides mineurs, calcinées et incorporées dans une matrice de verre, dans les ateliers de vitrification R7 et T7 du site Orano de La Hague.

L'inventaire de référence comprenant des déchets HA et HA0, le coût de forage profond des déchets HA uniquement peut être déduit grâce au prorata du volume respectif de ces déchets radioactifs dans le PIGD version E, pour un montant de 9 939 millions d'euros.

À ce stade, ces coûts ne permettent pas une comparabilité parfaite avec le périmètre des coûts associés à la mise en place de Cigéo. En effet, le périmètre de Allen Bates doit être complété avec les coûts suivants :

- coût d'investissement des installations conventionnelles de surface : gestion administrative, sécurité des personnes et des biens, fonctions d'accueil des travailleurs, des visiteurs et du public ;
- coût d'investissement des installations transverses : terrassements généraux du site, voiries, parkings, aires de stationnement et réseaux divers, les bâtiments de tri des déchets conventionnels, l'alimentation en électricité ;
- coût d'investissement des aménagements hors-site : raccordement aux réseaux d'eau potable, d'électricité et de télécom ; aménagements sur le réseau ferroviaire et routier ;
- coût de maîtrise d'ouvrage, de maîtrise d'œuvre, et d'assistance à maîtrise d'ouvrage ;
- assurances ;
- fiscalité.

Pour cela, nous nous basons sur les coûts correspondants dans la mise en place de Cigéo. Des hypothèses minorantes par rapport à celle de l'estimation de Cigéo ont été posées, car nous ne traitons que des déchets HA, et non des déchets HA et MA-VL comme dans le centre de stockage Cigéo.

Tableau 5.1-7 Estimation des coûts annexes pour une technologie prospective de type forage profond

Type de coût annexe	Hypothèse	Coût annexe
Installations conventionnelles de surface	50 % du montant correspondant de Cigéo (473 M€)	236 M€
Installations transverses	50 % du montant correspondant de Cigéo (1 545 M€)	773 M€
Aménagements hors-site	50 % du montant correspondant de Cigéo (154 M€)	77 M€
Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre	5,5 % du montant d'investissement annexe (1 086 M€)	60 M€
Assurances	50 % du montant correspondant de Cigéo (200 M€)	99 M€
Fiscalité	50 % du montant correspondant de Cigéo (904 M€)	452 M€
Coût annexe total		1 697 M€

Notons que ce coût unitaire vaut pour les cas où l'ensemble des déchets HA (HA et HA0) sont stockés avec une technologie de forage profond. C'est le cas de la branche 3.1.a (les déchets stockés pendant la phase industrielle pilote sont alors retirés de Cigéo) et de l'ensemble des branches de l'option 4 au sein desquelles la technologie prospective est mise en œuvre pour les déchets HA.

Dans le cas de l'option 2.1.b, ainsi que pour les branches 3.1.c et 3.2.a de l'option 3, seuls les déchets HA, hors HA0, sont stockés avec la technologie de forage profond. L'ensemble des déchets MA-VL étant stockés au sein de Cigéo, l'hypothèse est en effet posée que les déchets HA0 stockés lors de la phase industrielle pilote ne sont pas retirés.

Le coût de la technologie de forage profond portant uniquement sur les déchets HA, hors HA0, est alors estimé à 9 940 M€. Les coûts annexes sont supposés identiques au cas où les déchets HA et HA0 sont stockés avec une technologie de forage profond.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de la technologie prospective pour une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs est estimé à :

- environ 11 784 millions d'euros₂₀₁₉ pour les déchets HA et HA0, dont 10 087 millions d'euros₂₀₁₉ de coûts de forage et 1 697 millions d'euros₂₀₁₉ de coût annexe ;
- environ 11 636 millions d'euros₂₀₁₉ pour les déchets HA uniquement, dont 9 989 millions d'euros₂₀₁₉ de coûts de forage et 1 697 millions d'euros₂₀₁₉ de coût annexe.

5.1.4.2 Évolution des prix relatifs

Les dépenses de mise en place de la technologie prospective sont assimilés à des flux de type génie civil.

Consulter le chapitre 3.2.3 pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.5 Coût d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL

En préliminaire, il est rappelé que les technologies prospectives présentées dans ce chapitre n'existent pas au stade industriel ; elles ont été retenues uniquement dans le cadre spécifique de cette évaluation socioéconomique à titre conventionnel et illustratif.

De la même façon que pour les déchets HA, le coût unitaire de la technologie prospective pour les déchets MA-VL estime le coût de la mise en place de cette technologie prospective, dans ses différentes phases : essais, fonctionnement et démantèlement.

Dans les options, ce coût unitaire s'articule avec le coût unitaire de la R&D et le coût unitaire de recherche de site, afin de modéliser au mieux le processus de mise en place d'un choix de mise en sécurité définitive.

L'estimation du coût unitaire d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL, repose sur une illustration conventionnelle retenant un processus de densification des déchets MA-VL, préalable à la mise en forage profond. L'estimation du coût est ainsi réalisée en deux étapes détaillées dans les chapitres suivants.

5.1.5.1 Coût de densification des déchets MA-VL

Le chapitre 5.1.5 du présent document, précise que si les déchets HA disposent d'une géométrie compatible avec une mise en forage profond, certains déchets MA-VL, emprisonnés dans des colis de ciment cubiques, ou sous d'autres formes imposantes, ne sont pas compatibles en l'état en géométrie avec cette technologie. Pour cette raison, dans les options dans lesquelles une technologie prospective alternative est recherchée pour les MA-VL, l'évaluation socioéconomique prévoit une densification préalable à la mise en forage.

Concernant le coût de densification, nous nous appuyons sur l'« Évaluation technico-économique d'un procédé de traitement d'enrobés de boues bitumées par incinération/vitrification » du CEA (2015 (72)).

Il convient de souligner que le procédé chiffré dans le document mentionné ci-avant ne s'applique en aucun cas à l'ensemble des déchets de l'inventaire MA-VL, dont les caractéristiques physico-chimiques sont très variées : le traitement thermique systématique des déchets n'est pas une piste d'optimisation par densification. L'estimation du coût associé est ici utilisée à titre illustratif.

Dans cette note élaborée dans le cadre du PNGMDR 2013-2015, les coûts estimés pour environ 29 000 colis MA-VL et 33 000 colis FA-VL sont les suivants :

Tableau 5.1-8 Coût du processus de densification de l'étude CEA

Catégorie de coût	Coût
Coût de conception, réalisation, installation : génie civil, installation chantier, terrassement, ventilation, réseaux fluides, radioprotection, équipements, coûts de gestion, provisions pour risques	299 M€
Coût des équipements et du bâtiment : moyens de levage et de manutention présents dans l'installation, équipements spécifiques au procédé, chambres froides, etc.)	40 M€
Coût de fonctionnement : personnel, maintenance, taxes, divers	701 M€
Coût de démantèlement	35 M€
Coût total du processus de densification de l'étude CEA	1 075 M€

Il est à noter que le CEA a émis des réserves sur la pertinence de ce coût (l'évaluation technico-économique de ce traitement thermique d'enrobé de boues bitumées a été jugé a posteriori sous-évalué). À défaut d'autres études disponibles et publiées sur ce sujet au moment de la réalisation de cette évaluation socioéconomique, nous bâtissons le coût unitaire d'un processus de densification sur cette base.

Nous nous intéressons dans le cadre de cette évaluation socioéconomique au coût d'un processus de densification pour les 73 011 m³ de déchets MA-VL prévus par le PIGD version E.

L'étude menée par le CEA ne distingue pas, au sein des coûts de fonctionnement, les coûts attribuables à la densification des déchets MA-VL de ceux attribuables à la densification des déchets FA-VL (en pratique il existe un continuum de caractéristiques entre ces familles de déchets radioactifs, ce qui rend délicat l'estimation de coûts différenciés de densification). À défaut d'informations complémentaires sur le coût d'un processus de densification, nous nous basons sur cette étude, que nous extrapolons au cas étudié en posant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices mais nécessaires à la réalisation de l'exercice :

- les coûts de conception, équipement, bâtiment et démantèlement sont indépendants du volume de déchets traité, de la catégorie de déchet MA-VL et du nombre de catégories de déchets MA-VL. Cette hypothèse, certes simplificatrice, permet de ne pas surestimer les coûts d'investissement, et ainsi ne pas commettre de biais d'optimisme en faveur de Cigéo⁵¹ ;
- le coût de fonctionnement est proportionnel au volume de déchets traité, indépendamment de la typologie de déchets (FA-VL ou MA-VL) ;
- le coût de fonctionnement par m³ de déchets MA-VL traités est en moyenne identique ;
- le processus de densification ne modifie pas la masse totale des déchets traités, il accroît leur densité.

⁵¹ Certains colis ayant des caractéristiques physico-chimiques éloignées pourraient faire l'objet de coûts supplémentaires.

En se basant sur le ratio de volume des déchets MA-VL issu de l'inventaire de référence selon le PIGD version E (soit 73 011 mètres cubes) et du volume des déchets MA-VL et FA-VL issu de l'étude du CEA (soit 47 904 mètres cubes), nous obtenons l'estimation du coût de processus de densification suivant :

Tableau 5.1-9 Estimation du coût de processus de densification

Catégorie de coût	Étude CEA	Extrapolation au volume MA-VL de l'inventaire de référence (PIGD version E)
Coût de conception, réalisation et installation	299 M€	299 M€
Coût des équipements et du bâtiment	40 M€	40 M€
Coût de fonctionnement	701 M€	1 069 M€
Coût de démantèlement	35 M€	35 M€
Montant total	1 075 M€	1 443 M€

L'impact de ce processus de densification sur le volume de déchets MA-VL est fixé dans le cadre de cette évaluation socioéconomique à une réduction de moitié. Cette hypothèse est cohérente avec l'évaluation technico-économique du CEA (2015) (72) qui stipule que « le facteur de réduction de volume des déchets ultimes issus d'un traitement a été estimé à 2 ». Dans le cadre de la présente évaluation socioéconomique, ce facteur est retenu et appliqué au traitement visant à réduire le volume de tout type de déchet MA-VL, indépendamment de son conditionnement et de ses caractéristiques physico-chimiques.

5.1.5.2 Coût de forage profond des déchets MA-VL

Concernant les coûts de la mise en forage profond, nous nous appuyons ici encore sur la fourchette intermédiaire des coûts estimés par Bates et sur le calcul du coût de forage et de mise en forage établi dans le chapitre 5.1.4 du présent document, dans le cas des déchets HA, et noté dans l'équation ci-dessous C_{HA} . Le coût de forage à calculer dans le cas des déchets MA-VL repose ainsi sur le prorata du coût de forage des déchets HA par unité de volume, auquel est appliqué une hypothèse de réduction du volume de déchets MA-VL de moitié.

Hors coût de densification et coût annexe, le coût de forage pour les déchets MA-VL est donc calculé de la manière suivante :

$$C_{MA-VL} = \frac{C_{HA}}{V_{HA}} \times \frac{V_{MA-VL}}{2}$$

Soit

$$36\,658 \text{ M€} = \frac{10\,087 \text{ M€}}{10\,045} \times \frac{73\,011}{2}$$

Rappelons que selon l'inventaire de référence (PIGD version E), le volume des déchets MA-VL représente 73 011 m³, et celui des déchets HA est de 10 045 m³.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de la technologie prospective pour une mise en sécurité définitive des déchets MA-VL, intégrant un processus de densification préalable à une mise en forage profond, est estimé à 39 798 millions d'euros. Ce coût intègre 1 443 millions d'euros₂₀₁₉ de coût de densification, 36 658 millions d'euros₂₀₁₉ de coût de forage et 1 697 millions d'euros₂₀₁₉ de coûts annexes. Le détail de calcul est disponible en annexe 16.1.4.

Par ailleurs, dans le cas où la recherche pour les MA-VL et les HA est menée de concert, le coût total de mise en œuvre de la technologie prospective pour les déchets MA-VL et les déchets HA est estimé en ajoutant au coût de la technologie prospective pour les déchets MA-VL :

- Le coût de mise en forage des déchets HA (10 087 M€) ;
- Un doublement des coûts d'assurance et de fiscalité, pour un coût annexe total de 2 249 M€.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de la technologie prospective pour une mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL, intégrant un processus de densification préalable à une mise en forage profond pour les déchets MA-VL, est estimé à 50 436 millions d'euros. Ce coût intègre 1 443 millions d'euros₂₀₁₉ de coût de densification, 46 745 millions d'euros₂₀₁₉ de coût de forage et 2 248 millions d'euros₂₀₁₉ de coûts annexes. Le détail de calcul est disponible en annexe 16.1.4.

5.1.5.3 Coût de reprise des déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo

La reprise des déchets MA-VL déjà stockés dans le centre de stockage Cigéo se pose dans le cas où une technologie prospective est trouvée pour les MA-VL, alors que la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo ont été réalisés. C'est le cas de la branche 3.1.a de l'option 3⁵². Cette hypothèse de récupération des déchets radioactifs est illustrative et cohérente avec le principe de réversibilité du centre de stockage Cigéo, prévu par la loi.

En l'absence d'étude technico-économique sur la question, et afin de fournir un ordre de grandeur du coût de la reprise des colis, nous posons l'hypothèse que le coût de reprise des déchets est équivalent au coût de la mise en stockage pendant la phase industrielle pilote, soit environ 970 millions d'euros d'exploitation, d'impôts, d'assurances, et de maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre.

5.1.5.4 Évolution des prix relatifs

Les dépenses de mise en place de la technologie prospective sont assimilés à des flux de type génie civil.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

⁵² Notamment entre les années 2070 et 2079.

5.1.6 Coût d'entreposage

Le coût unitaire d'entreposage intervient dans les options 2, 3 et 4 ; il s'agit d'un surcoût d'entreposage par rapport aux besoins d'entreposage associés à l'option de projet 1.

5.1.6.1 Contexte actuel de l'entreposage temporaire

Avant leur stockage en couche géologique profonde, les déchets radioactifs sont entreposés.

Les solutions techniques actuellement employées en France consistent à entreposer les déchets HA et MA-VL à sec sur les sites nucléarisés (73), dans l'attente d'une solution de mise en sécurité définitive. Dans le cas des déchets HA, un entreposage de type puits (ou « Vault ») est mis en place (74) (cf. Figure 5.1-3). Les déchets MA-VL (cf. Figure 5.1-4) sont la plupart du temps entreposés dans des colis (acier ou béton notamment) dans des installations dédiées. La moindre puissance thermique des déchets MA-VL par rapport aux déchets HA explique une complexité technique moindre concernant les modalités d'entreposage. Cette différence impacte les coûts de l'entreposage.



Figure 5.1-3

Exemple d'installation d'entreposage de déchets HA de type puits : hall d'entreposage de l'atelier de vitrification R7 UP2 800 du site Orano de La Hague © Orano



Figure 5.1-4

Exemple d'installation d'entreposage de déchets MA-VL : installation STE3 (photo prise à travers un hublot de protection) du site Orano de La Hague © Orano

Les installations actuelles d'entreposage à sec en France sont listées dans le tableau 5.1-10.

Tableau 5.1-10 État des lieux actuel des installations d'entreposage temporaire des déchets MA-VL et HA en France

Entreprise	Nom de l'installation	Type de déchets entreposés	Capacité ⁵³	Date de mise en service
CEA	CEDRA (Cadarache)	MA-VL	MA-VL FI ⁵⁴ : 8 000 colis - 4 450 m ³ MA-VL MI ⁵⁵ : 500 colis - 825 m ³	2006
	SVM (Marcoule)	HA et quelques MA-VL	3 800 places - 665 m ³	1978
	DIADEM (Marcoule) en cours de construction	MA-VL et FMA-VC	405 m ³	2019 (estimation)
	EIP (Marcoule)	MA-VL et FA-VL	11 500 colis - 4 370 m ³	2000
Orano	R7 ; T7 ; E-EV-SE ; E-EV-LH – en cours d'extension	HA	16 750 colis - 3 000 m ³ (avant extension 2017)	1989, 1992, 1996, 2013
	EDS	MA-VL	15 000 m ³	1990, 2008, 2009
	S ; ES	MA-VL	47 000 colis - 10 440 m ³	1987, 1995
	ECC	MA-VL	20 800 colis - 3 744 m ³	2002
EDF	ICEDA (Bugey) en cours d'essais	MA-VL	2 700 colis - 5 400 m ³	2020 (estimation)

5.1.6.2 Estimation du surcoût d'entreposage

Les coûts liés à l'allongement de la durée d'entreposage sont estimés à partir des données fournies individuellement par les producteurs de déchets. Ces coûts sont de l'ordre de plusieurs dizaines de millions d'euros par année, seulement pour les coûts de fonctionnement. Les coûts d'investissement, visant à renouveler les sites d'entreposage, diffèrent selon les producteurs ; la chronique des coûts diffère selon les dates de construction initiale des sites actuels d'entreposage.

Pour illustration, si tous les entrepôts devaient être reconstruits en même temps, l'investissement serait de l'ordre de plusieurs milliards. Notons que les coûts estimés le sont *a minima*, car ils ne tiennent pas compte des coûts de surveillance militaire des sites d'entreposage, dont les montants sont classés secret défense.

Les coûts affectés à l'entreposage dans les différentes options, seront exprimés en différentiel par rapport à l'option de projet 1. Les chroniques peuvent varier selon les options dès l'envoi du premier colis MA-VL en phase industrielle pilote.

⁵³ Données issues de (75) et (76).

⁵⁴ FI : faiblement irradiant.

⁵⁵ MI : moyennement irradiant.

5.1.6.3 Évolution des prix relatifs

Les coûts d'entreposage sont assimilés à des flux de type génie civil.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.7 Coût de transport

5.1.7.1 Coût unitaire

Le coût unitaire de transport intervient dans les options 2, 3, 4. Ce coût de transport a été calculé pour chaque option d'investissement, sur la base d'extrapolations issues des chroniques de livraison des déchets depuis leur site d'entreposage temporaire actuel vers le centre de stockage Cigéo, présentées dans la version E du PIGD (la dernière disponible à date), ainsi que sur des éléments de gestion du ressort des producteurs.

Le transport des colis est principalement requis pour déplacer les colis de déchets radioactifs entre le site d'entreposage temporaire et le site de mise en sécurité définitive, quelles que soient les options. A noter que dans l'option 4, le transport des colis en phase industrielle pilote dès 2030 n'a pas lieu, conformément aux hypothèses de cette option.

En conséquence, les seules différences entre les options et leurs différentes branches concernent les dates et périodes durant lesquelles les colis sont transportés. A défaut de connaître le lieu où serait situé le site de stockage retenu dans la modélisation de la technologie prospective, et de connaître des coûts de transport par kilomètre, nous posons l'hypothèse que tous les sites de stockage sont équidistants des sites d'entreposage. De fait, à volume de déchets constant, il n'y a pas de différence de coût brut lié aux transports entre les différentes options.

Les différences s'observent uniquement en tenant compte des *scenarii* (en fonction du caractère plus ou moins chaotique de la société, les normes de sûreté seront plus ou moins élevées, générant des coûts plus ou moins importants), et de l'actualisation (des dépenses de transport survenant plus tardivement pèsent moins dans le résultat actualisé, qui écrase plus fortement le futur).

Par ailleurs, des transports supplémentaires de colis sont également requis dans les options où la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo est lancée en phase initiale avec en parallèle le succès de l'effort de R&D conduisant à trouver une technologie prospective préférable au stockage géologique profond, pour les déchets HA et MA-VL. En effet, dans ce cas de la modélisation, il convient alors de retirer les colis stockés dans le centre de stockage Cigéo pendant la phase industrielle pilote, et de les transporter une deuxième fois, jusqu'à leur nouveau site de stockage par forage profond.

Les coûts de transport sont identiques pour l'ensemble des branches des options 1, 2 et 3 jusqu'en 2070, pour ce qui concerne le transport des colis, en phase industrielle pilote, des installations d'entreposage temporaire vers le centre de stockage Cigéo.

Au-delà de 2070, si l'on prévoit de déplacer l'ensemble des déchets du lieu d'entreposage temporaire jusqu'à l'endroit où se situera la technologie prospective utilisée pour gérer définitivement les déchets, la chronique de transport des déchets diffèrera selon les options et les branches.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de transport pour l'ensemble des déchets HA et MA-VL entre le site d'entreposage temporaire et le centre de stockage Cigéo est estimé à environ 1 472 millions d'euros₂₀₁₉.

5.1.7.2 Évolution des prix relatifs

Les coûts de transport sont assimilés à des flux de type génie civil.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.8 Coût des GIP

5.1.8.1 Coût unitaire

Tel que détaillé au chapitre 5.1.3 de ce document, l'accompagnement économique attribué par les groupements d'intérêts publics aux acteurs sur le territoire concernent essentiellement les subventions aux communes les plus proches (distance inférieure à 10 km) et les subventions ou prêts attribués à des porteurs de projets publics ou privés. Sur la période 1999-2019, on estime à plus de 800 M€ les coûts de ces GIP.

Nous posons les hypothèses suivantes concernant les projections de dépenses de GIP :

- pour l'ensemble des options, le montant alloué à chacun des deux groupements d'intérêts publics (GIP Objectif Meuse et GIP Haute-Marne), correspondant à une dépense annuelle de 30 millions d'euros par groupement d'intérêt public, se poursuit entre 2019 et 2025 ;
- pour les branches des options 1, 2 et 3 au sein desquelles le décret d'autorisation de création est émis en 2025, les GIP s'arrêtent à partir de cette date ;
- pour l'option 4, l'accompagnement économique attribué par les GIP se poursuit jusqu'en 2070, mais il est réduit à 15 millions d'euros par an et par GIP.

5.1.8.2 Évolution des prix relatifs

Les coûts de GIP sont assimilés à des flux de type recherche et maintien des compétences.

Consulter au chapitre 3.2.3 de ce document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.9 Coût de maintien des compétences

5.1.9.1 Coût unitaire

Le coût unitaire de maintien des compétences estime les efforts nécessaires pour assurer la pérennité de la connaissance théorique et technologique relative à la gestion des déchets radioactifs, notamment en cas de situation d'attente, sans démarche active et appliquée.

Ainsi, des dépenses de maintien des compétences doivent être engagées dans le cas où le projet global Cigéo est suspendu et susceptible d'être réactivé par la suite, à l'issue d'une période de R&D (option 4). Dans ce cas, il est important de considérer la possible perte de connaissances et de compétences pour la réalisation d'un centre de stockage géologique profond. Une perte de compétences pourrait engendrer des coûts supplémentaires ou des retards lors de la réalisation décalée du stockage géologique profond.

Actuellement, ce point est illustré par les difficultés qu'éprouve le chantier de l'EPR de Flamanville. Une partie des retards et coûts additionnels est expliquée par une perte de compétences d'EDF et de ses sous-traitants depuis la dernière construction d'une centrale nucléaire en France (2018 (77)).

Les compétences considérées visent essentiellement les connaissances :

- de l'Andra sur le stockage géologique profond (son dimensionnement, son architecture, les mesures de sûreté à mettre en place, la connaissance sur le comportement des roches, les travaux souterrains, etc.) ;
- mais également celles détenues par les producteurs : compétences sur la gestion des déchets radioactifs, leur conditionnement (contenu des colis de déchets, comportement de ces déchets dans leur colis d'entreposage, etc.), et leur transport ;
- ou encore les connaissances de l'ASN de contrôle de la sûreté nucléaire.

Une prise en compte possible de cet effet dans cette évaluation socioéconomique est de considérer un coût de maintien des compétences associé au stockage géologique profond, afin de conserver cette possibilité ouverte, techniquement réalisable et d'éviter un surcoût si une réalisation intervient dans le futur (dans le cadre de cette évaluation, à partir de 2070 ou 2100). Un premier indicateur pour prendre en compte ce coût de maintien des compétences pourrait être approché par la valorisation des salaires des personnels de l'Andra travaillant actuellement sur le projet global Cigéo.

En 2017, 304 équivalents temps plein ont travaillé sur le projet de global Cigéo⁵⁶. En se basant sur un coût horaire entre 40 € et 60 €⁵⁷, cela conduit à un coût approximatif de 19 à 29 millions d'euros par an.

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de maintien des compétences est estimé à la valeur moyenne de 24 millions d'euros par an.

5.1.9.2 Évolution des prix relatifs

Ces dépenses sont assimilées à des flux de type recherche et maintien des compétences.

Consulter le chapitre 3.2.3 du présent document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.10 Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne

5.1.10.1 Coût unitaire

Le coût unitaire de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne concerne les efforts nécessaires pour laisser ouverte la disponibilité du site d'implantation pour un stockage géologique.

Des coûts de maintien du site de Meuse/Haute-Marne sont engagés dans l'option 4, entre 2019 et 2070, dans l'attente de savoir si le site est conservé et si le stockage en couche géologique profonde est le choix de mise en sécurité définitive retenu. Les hypothèses suivantes ont été formulées quant aux dépenses de maintien de site à considérer *a minima* :

⁵⁶ Source Andra, un équivalent temps plein correspond à 1 570 heures par an.

⁵⁷ Valeurs prises pour les taux horaires du personnel statuaire dans l'Évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue - Proposition de l'Andra Tome 2 (67).

- maintien du fonctionnement du laboratoire souterrain sur la durée de la période de recherche (2019-2069)⁵⁸ : nous mobilisons le coût annuel de 23,8 millions d’euros par an, égal au montant moyen des 5 dernières années de fonctionnement ;
- maintien des dépenses de communication, insertion territoriale et observation de l’environnement sur la durée de la période de recherche (2019-2069), à hauteur de 8,6 millions d’euros par an (montant annuel des 5 dernières années de fonctionnement).

► NOTE IMPORTANTE

Le coût unitaire de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne est estimé à 32 millions d’euros par an.

5.1.10.2 Évolution des prix relatifs

Ces dépenses sont assimilées à des flux des flux de type recherche et maintien des compétences.

Consulter le chapitre 3.2.3 de ce document, pour les précisions théoriques et méthodologiques et pour retrouver les valeurs des élasticités pour chaque borne et dans les deux *scenarii*.

5.1.11 Récapitulatif des coûts unitaires

Tableau 5.1-11 Récapitulatif des coûts unitaires

Coût unitaire		Montant (déterministe) ou hypothèse	Source
Coût de mise en place de Cigéo (conception-construction, fonctionnement et fermeture)		25 000 M€ ₂₀₁₂ sur la période 2016-2156 Soit 25 811 M€ ₂₀₁₉ sur la période 2019-2156	Andra et DGEC
Coût de R&D	Pour une technologie HA	3 570 M€ (70 M€/an)	Activités de recherche réalisées dans le cadre de la loi « Bataille »
	Pour une technologie HA et MA-VL	7 140 M€ (140 M€/an)	
Coût d'une technologie prospective (conception-construction, fonctionnement et fermeture)	Pour la mise en forage profond des déchets HA (dont coûts annexes)	11 637 M€ (HA uniquement) 11 784 M€ (HA0 et HA)	Allen Bates (2015 (65))
	Pour la densification des déchets MA-VL	1 443 M€	CEA (2015)
	Pour la mise en forage profond des déchets MA-VL (dont coûts annexes)	38 355 M€	Allen Bates (2015 (65))

⁵⁸ Actuellement, le laboratoire souterrain n'est autorisé que jusqu'en 2030.

Coût unitaire		Montant (déterministe) ou hypothèse	Source
	Pour la mise en forage profond des déchets HA et MA-VL (dont coûts annexes)	48 994 M€	Allen Bates (2015 (65))
Coût d'entreposage (surcoût)		Propre à chaque branche	Producteurs
Coût de transport		1 472 M€	Producteurs
Coût de recherche de site	Pour le stockage géologique profond sur un nouveau site	3 989 M€	Rapports financiers et synthèses de faisabilité de financement de l'Andra et des GIP Objectif Meuse et Haute-Marne
	Pour une technologie prospective	6 294 M€	
Coût de maintien des compétences		24 M€/an	Andra : hypothèse coût ETP Andra travaillant sur Cigéo
Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne		32 M€/an	Andra : hypothèse fonctionnement du laboratoire souterrain et insertion territoriale
Coût des GIP		60 M€/an jusqu'en 2025 30 M€/an à partir de 2026 et jusqu'en 2069 si Cigéo n'est pas mis en place dès 2019	GIP Objectif Meuse et GIP Haute-Marne

5.1.12 Aléas sur les coûts unitaires

Les coûts unitaires estimés dans les chapitres précédents sont entourés de plages de risques⁵⁹. En effet, les coûts de grands investissements ont tendance à être sous-estimés, et la durée de l'étude est ici particulièrement longue. Il n'est donc pas réaliste de chercher à fournir des estimations déterministes (c'est-à-dire sans plage de risque), et il convient plutôt d'attribuer une fourchette de valeurs possibles.

L'approche probabiliste s'appuie ici sur une approche de Monte-Carlo. La simulation de Monte-Carlo est un outil statistique pour estimer la moyenne d'une variable aléatoire. Elle consiste à attacher à chaque variable de coût une distribution, représentative de l'ensemble des valeurs que la variable peut prendre. Un nombre important de tirages (10 000) est par la suite simulé (le standard est entre 1 000 et 10 000). Il convient donc de choisir, pour chaque paramètre de coût, la distribution la plus adaptée.

Nous choisissons ici, par simplicité et cohérence, d'attribuer la même distribution pour l'ensemble des lignes de coûts. Nous optons pour une distribution uniforme : le minimum est défini comme 80 % du coût déterministe et le maximum comme 150 % du coût déterministe.

Pour le centre de stockage Cigéo, notons que 100 % correspond à la valeur du coût arrêté par la Ministre (environ 25 milliards €₂₀₁₉) (6) ; tandis que la borne à 80 % équivaut à un montant de 20 milliards d'euros, correspondant à la proposition de coût objectif (hors risques), fruit d'un travail de mise en commun

⁵⁹ On parle ici de risque ou d'aléa sur les coûts et non d'incertitude, car le risque est probabilisable, tandis que l'incertitude ne l'est pas. Ici, puisqu'on encadre les sur-estimations et sous-estimations d'une loi de probabilité, il s'agit par définition d'un risque.

d'Areva, du CEA et d'EDF en 2015 (78). Enfin, la borne à 150 % suggère un coût de 37,5 milliards d'euros, soit légèrement supérieur au coût esquisse élaboré par l'Andra (66) (67).

Nous illustrons ainsi que, dans ce type de mégaprojets, on observe peu d'exemples au sein desquels les coûts effectifs sont inférieurs aux coûts prévus ; les dépassements de coûts sont en revanche courants, et peuvent être substantiels.

5.1.13 Probabilité de succès des recherches et de perte de site

Dans les différentes branches et options, des probabilités sont affectées à trois questions :

- quelle est la probabilité de succès de la R&D ?
- quelle est la probabilité de perte du site actuel de Meuse/Haute-Marne ?
- quelle est la probabilité de succès de la recherche d'un nouveau site de stockage profond ?

5.1.13.1 Probabilité de succès de la recherche (R&D et site)

Comme explicité dans le chapitre 4 détaillant les branches des différentes options, la R&D est considérée fructueuse lorsqu'elle combine le succès de la R&D fondamentale pour développer une technologie prospective à un niveau de sûreté au moins équivalent à celui de l'option de projet 1, et le succès de la recherche de site, permettant de trouver un site d'implantation.

Notons qu'il est très complexe, voire impossible, de modéliser ou d'estimer la probabilité de succès de la recherche, en particulier sur un horizon de temps de plusieurs décennies. Nous faisons donc le choix d'une plage de valeurs de réussite, dont la distribution est supposée uniforme. En d'autres termes, contrairement à une loi normale ou une loi triangulaire, nous choisissons une probabilité de base (0,5) pour mener l'analyse déterministe, sans que cette probabilité ne soit jugée plus ou moins réaliste que les autres valeurs contenues dans la fourchette (comprise entre 0,3 et 0,7).

Par ailleurs, rappelons que cette probabilité de succès reflète l'avènement de deux recherches distinctes : la probabilité, d'une part, de trouver une technologie prospective ; la probabilité, d'autre part, de trouver un site d'implantation. Ces deux conditions doivent être impérativement réunies pour qu'une technologie prospective puisse être mise en place. La probabilité de succès concernant le volet technologique paraît, à dire d'experts, relativement élevée ; en particulier si on se focalise sur le forage profond et avec des échelles de temps de recherche larges. La probabilité de trouver un site d'implantation est, quant à elle, hautement incertaine. À dire d'experts, il faudrait compter *a minima* une trentaine d'années pour trouver un nouveau site, avec une très grande incertitude sur l'acceptabilité d'une telle démarche.

Nous adoptons donc une plage de probabilité très large : [0,3 ; 0,7]. Nous choisissons arbitrairement la moyenne de ces deux chiffres, soit 0,5 pour l'analyse déterministe.

Par ailleurs, nous supposons, à dire d'experts, que, si une technologie de forage profond est trouvée pour les déchets HA, alors la probabilité de réussite pour une technologie de densification est élevée : par hypothèse, nous la projetons à 90 %. Cette valeur est une hypothèse basée sur l'avancement actuel de la technologie et projeté en 2070 avec des dépenses de R&D d'ici là.

5.1.13.2 Probabilité de perte du site actuel de Meuse/Haute-Marne

Au sein de l'option 4, aucun investissement dans Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne n'est lancé en 2019 ; ainsi, il apparaît une possibilité de perte du site, suite par exemple à une montée de la contestation liée à l'implantation du site de stockage des déchets radioactifs.

Tout comme la probabilité d'identifier une technologie prospective, il est très complexe de modéliser la probabilité de perte du site de Meuse/Haute-Marne. Nous faisons donc ici aussi le choix d'une plage de valeurs de perte du site de Meuse/Haute-Marne, dont la distribution est supposée uniforme, et comprise entre 0,3 et 0,7.

5.1.13.3 Probabilité de succès de la recherche d'un nouveau site pour le stockage profond

Dans les branches 4.4 et 4.7 de l'option 4, une recherche d'un nouveau site pour Cigéo suite à la perte de Meuse/Haute-Marne est lancée. Cette recherche peut avoir pour objectif un site pour les déchets MA-VL uniquement (4.4) ou pour les déchets HA et MA-VL (4.7).

Ici aussi, nous faisons le choix d'une plage de valeurs de réussite, dont la distribution est supposée uniforme, et comprise entre 0,3 et 0,7.

Les principales familles de coûts étant décrites, il est désormais aisé de détailler simplement le coût de chaque option. C'est l'objet des chapitres 5.2 à 5.5 ci-après.

5.2 Coût de l'option de projet 1

Rappelons que l'option de projet 1 décrit une configuration où le décideur public lance, après avis favorable de l'ASN, la réalisation du centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi, afin que tous les déchets soient gérés en ayant recours au stockage en couche géologique profonde. Cette option est réalisée sans investissement complémentaire dans la R&D en vue de trouver une solution alternative.

En complément, le lecteur peut se reporter à l'annexe 15 pour disposer de plus de détails et visualiser les représentations graphiques.

5.2.1 Coût brut de l'option de projet 1

Le chiffrage de l'option de projet 1 est simplement constitué de trois types de coûts : les coûts afférents à Cigéo, les coûts de transport et les coûts des GIP. Ils peuvent être résumés comme suit :

Tableau 5.2-1 Coût brut de l'option de projet 1, en €₂₀₁₉

Option de projet 1	
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA	
Coût de mise en place de Cigéo	25 811 M€
Coût de transport	1 472 M€
Coût des GIP	420 M€
Coût brut total	27 703 M€

Nous rappelons qu'il s'agit à ce stade du coût brut, c'est-à-dire sans prise en compte des prix relatifs des différents *scenarii* et sans prise en compte du temps long (actualisation).

La répartition des coûts afférents à la mise en place de Cigéo est représentée dans la figure 5.2-1, et leur évolution dans la figure 5.2-2.

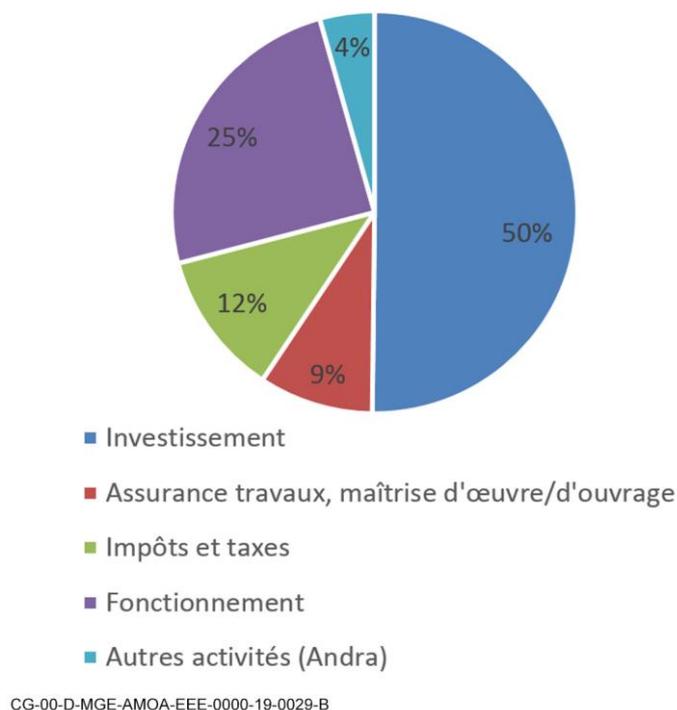


Figure 5.2-1 La répartition des coûts afférents à Cigéo

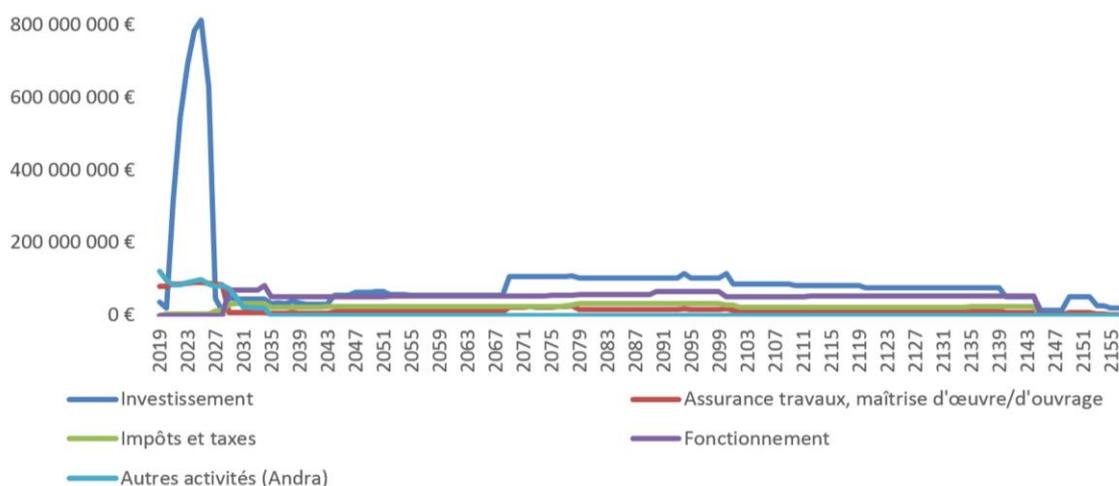
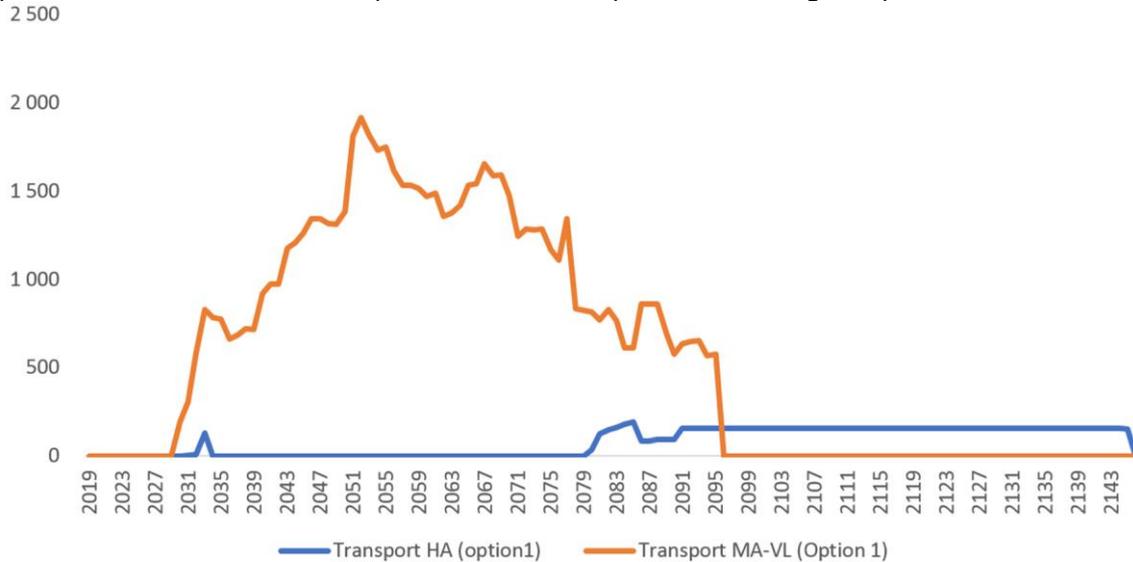


Figure 5.2-2 Chronique du coût de mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1, par composante

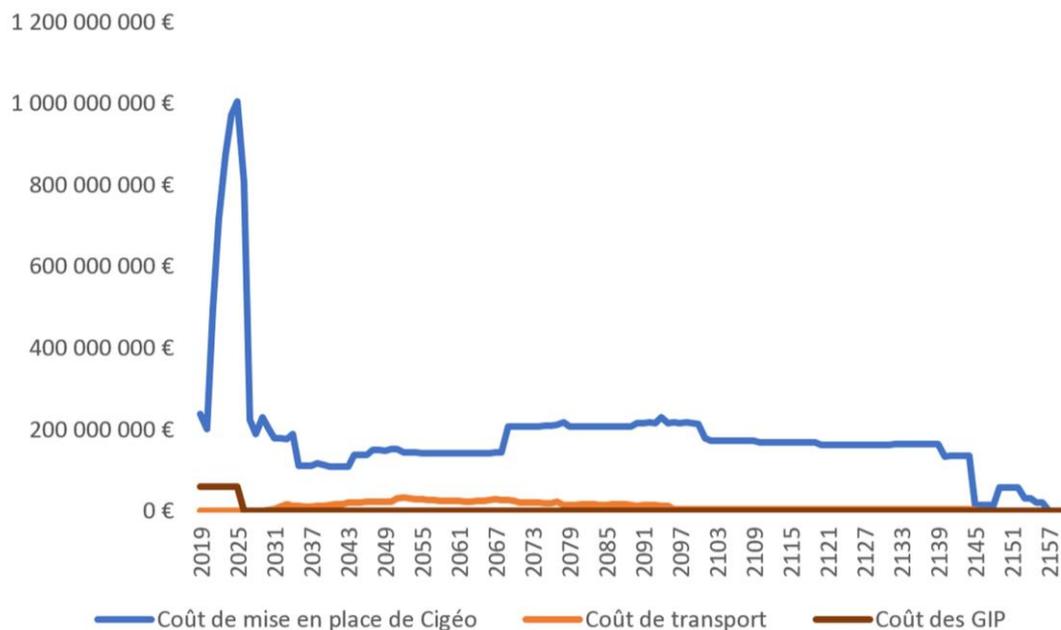
Enfin, la chronique de transport pour l'acheminement des déchets radioactifs depuis leur site d'entreposage vers le centre de stockage Cigéo débute lors de la phase industrielle pilote, avec des déchets MA-VL à partir de 2030 et se poursuit jusqu'en 2095 pour leur stockage lors de la phase de fonctionnement (intervenant, pour mémoire, sur la période 2040-2100). La chronique de transport des HA, après la période de phase industrielle pilote intervenant jusqu'en 2035 pour les déchets HA0, reprend ensuite à l'horizon de la période 2080-2145 pour leur stockage en phase de fonctionnement.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0031-B

Figure 5.2-3 Chronique de transport des déchets pour l'option de projet 1 - en m³ de colis

La chronique du coût brut de l'option de projet 1 est représentée dans le graphique ci-dessous.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0032-B

Figure 5.2-4 Chronique du coût brut de l'option de projet 1

5.2.2 Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option de projet 1

Pour prendre en compte les possibles aléas sur les coûts de l'option de projet 1, nous effectuons une approche probabiliste, à l'aide d'une modélisation Monte-Carlo de 10 000 tirages, sur la base des distributions de coûts décrites dans les descriptions des coûts unitaires (cf. chapitre 5.1.12 du présent document).

En moyenne, le coût de l'option de projet 1 s'élève à 31 858 millions d'euros, soit au-delà des 27 703 millions d'euros estimés dans l'approche déterministe. Ce surcoût s'explique par les hypothèses de surcoût portant sur l'ensemble des postes de dépenses, dont les distributions sont supposées uniformes, entre 80 % et 150 % du coût déterministe estimé. L'intervalle de confiance de 90 % est compris entre environ 23 306 millions d'euros et 39 971 millions d'euros.

Les représentations graphiques de ces tirages sont disponibles en annexe.

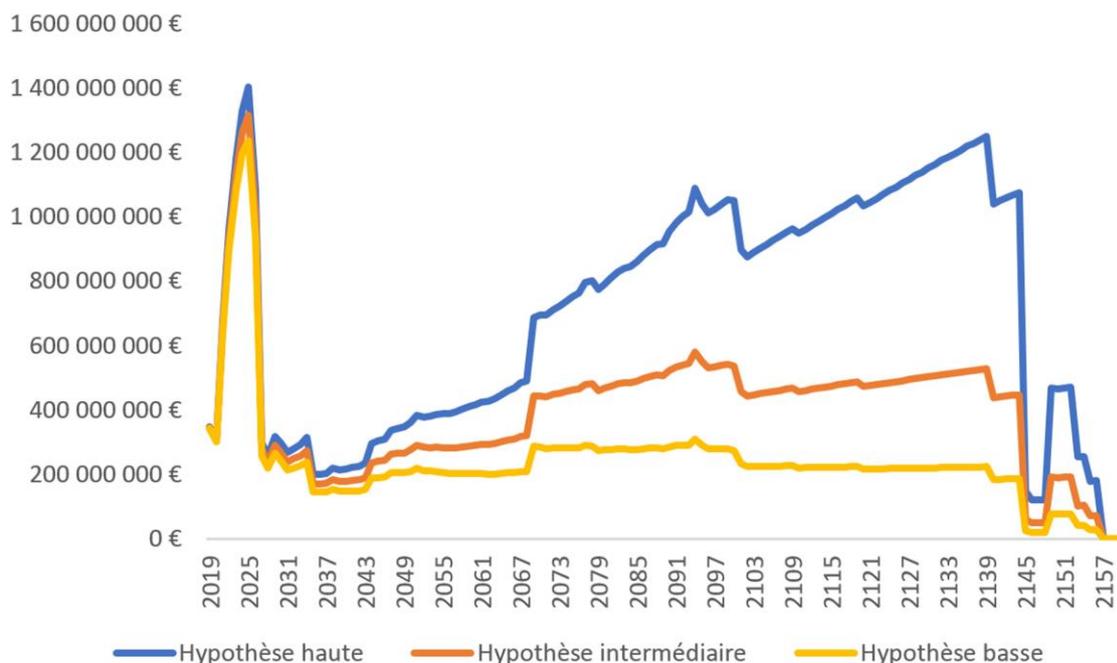
5.2.3 Prise en compte des prix relatifs dans les coûts l'option de projet 1

Rappelons que les prix relatifs visent à tenir compte des éventuelles évolutions des prix en fonction de leur élasticité au PIB. Or, comme décrit dans au chapitre 3.2.3 du présent document, les projections de PIB sont modélisées différemment en fonction des *scenarii* considérés, et des hypothèses (basse, intermédiaire et haute) placées sur leurs évolutions.

Tableau 5.2-2 Estimation du coût de l'option de projet 1 avec prise en compte des prix relatifs et de l'aléa

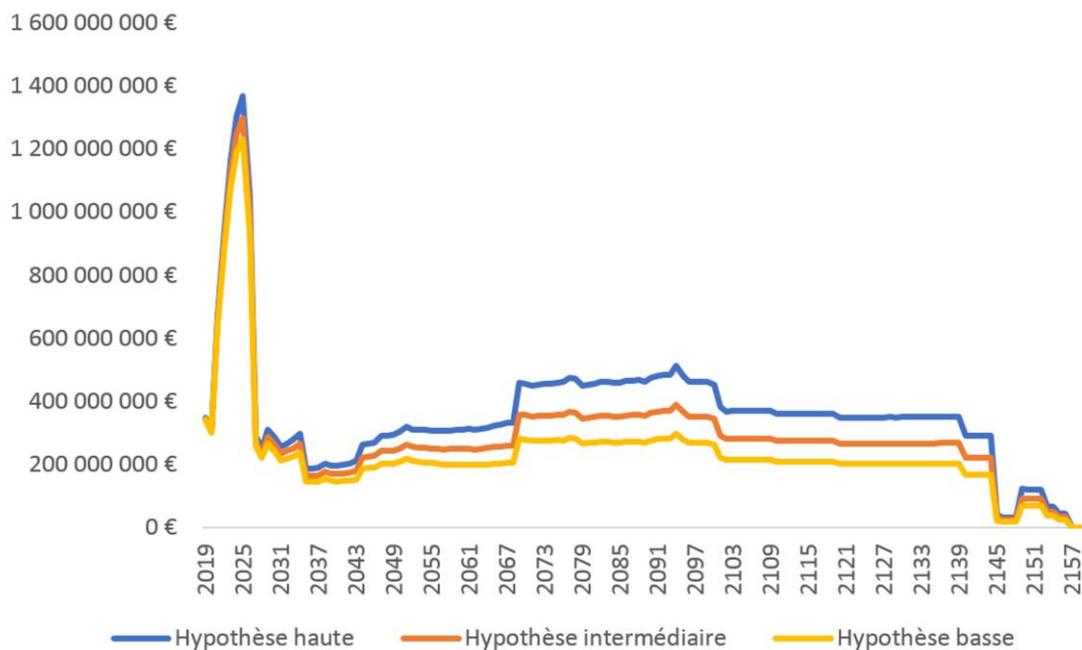
Option de projet 1		Scénario OK	Scénario KO
Coût brut		27 703 M€	
Coût avec prise en compte des prix relatifs et de l'aléa (moyenne)	Borne haute	99 065 M€	49 946 M€
	Borne intermédiaire	55 982 M€	40 498 M€
	Borne basse	34 123 M€	33 102 M€

On note ainsi qu'avec la prise en compte des prix relatifs, l'option de projet 1 coûte plus cher en scénario OK qu'en scénario KO (que l'on raisonne en approche probabiliste ou déterministe). Cet écart s'explique par la prise en compte de taux de croissance plus faibles en scénario KO.



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0026-A

Figure 5.2-5 Coût de l'option de projet 1 en scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0025-A

Figure 5.2-6 Coût de l'option de projet 1 en scénario KO

5.2.4 Coût actualisé de l'option de projet 1

La prise en compte du temps long s'effectue par la mobilisation d'un taux d'actualisation. Comme expliqué dans le chapitre 3 du présent document, des taux d'actualisation différenciés sont mobilisés selon le scénario OK ou KO. De plus, au sein d'un même scénario, une borne haute, une borne intermédiaire et une borne basse ont été définies pour tenir compte des débats théoriques et de l'incertitude des différents paramètres du système d'actualisation.

5.2.4.1 Scenarii OK et KO

Les résultats actualisés sont résumés dans le tableau ci-dessous (ils tiennent compte des prix relatifs). Ils sont exprimés *via* l'approche probabiliste. Plus précisément, il n'y a pas de tirage sur la valeur des taux d'actualisation, en revanche, chaque tirage est actualisé.

Tableau 5.2-3 Estimation du coût de l'option de projet 1 avec prise en compte du temps long (actualisation)

Option de projet 1		Espérance	Intervalle de confiance 90 %
Coût brut moyen		31 858 M€	Entre 23 717 M€ et 39 971 M€
Coût actualisé en scénario OK	Taux d'actualisation haut	9 836 M€	Entre 7 360 M€ et 12 311 M€
	Taux d'actualisation intermédiaire	12 544 M€	Entre 9 389 M€ et 15 695 M€
	Taux d'actualisation bas	14 482 M€	Entre 10 822 M€ et 18 146 M€
Coût actualisé en scénario KO	Taux d'actualisation haut	11 646 M€	Entre 8 728 M€ et 14 566 M€
	Taux d'actualisation intermédiaire	16 741 M€	Entre 12 503 M€ et 20 976 M€
	Taux d'actualisation bas	22 835 M€	Entre 17 028 M€ et 28 636 M€

Les représentations graphiques des résultats de tirage Monte-Carlo sur des flux actualisés, aux différents taux et dans les différents *scenarii* sont présentées dans l'Annexe 15.

► QUE SE PASSERAIT-IL SI L'INVESTISSEMENT DANS LE CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO ÉTAIT SIMPLEMENT DÉCALÉ DE 10 ANS OU 20 ANS ?

Un calcul est effectué pour voir à quel point, par le jeu de l'actualisation, le coût de cette option de projet 1 diminuerait si on retardait la mise en place du centre de stockage Cigéo. Les gains mécaniques permis par le phénomène d'actualisation sont comparés aux surcoûts engendrés en termes d'entreposage, de maintien compétences et de maintien du site, ainsi que de dépenses supplémentaires de GIP. Le détail de ce calcul se trouve en annexe 19.

Ces dépenses immédiates évitées sont à mettre en balance des coûts consécutifs à une éventualité de perdre le site de Meuse/Haute-Marne, qui n'est ici pas modélisée. Cette perte est en effet modélisée en option 4. L'objectif de cet encadré est essentiellement de mettre en évidence le phénomène d'actualisation.

En scénario OK, les coûts actualisés estimés sont les suivants :

- si Cigéo est mis en œuvre en 2019 (soit l'option de projet 1), le coût actualisé de sa mise en place est de 9 836 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 12 544 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 14 482 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas ;
- si Cigéo est mis en œuvre en 2029, le coût actualisé de sa mise en place s'élève à 7 891 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 10 917 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 13 151 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas ;
- si Cigéo est mise en place en 2039, le coût actualisé de sa mise en place s'élève à 6 712 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 9 896 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 12 394 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas.

En scénario KO, les coûts actualisés estimés sont les suivants :

- si Cigéo est mis en œuvre en 2019 (soit l'option de projet 1), le coût actualisé de sa mise en place est de 11 646 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 16 741 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 22 835 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas ;
- si Cigéo est mis en œuvre en 2029, avec un décalage de 10 ans, le coût actualisé de sa mise en place s'élève à 9 956 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 15 713 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 22 781 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas ;
- si Cigéo est mise en place en 2039, avec un décalage de 20 ans, le coût actualisé de sa mise en place s'élève à 8 920 millions d'euros avec le taux d'actualisation haut, 15 195 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire, et 23 275 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas.

Dans tous les cas, ce calcul élémentaire aboutit à l'observation que retarder des coûts est bénéfique sur le plan financier ; il suppose cependant que le site n'est pas perdu. L'effet bénéfique de retarder la dépense doit donc être contrebalancée avec le risque de perte du site, difficile à apprécier, et qui peut avoir de nombreuses origines.

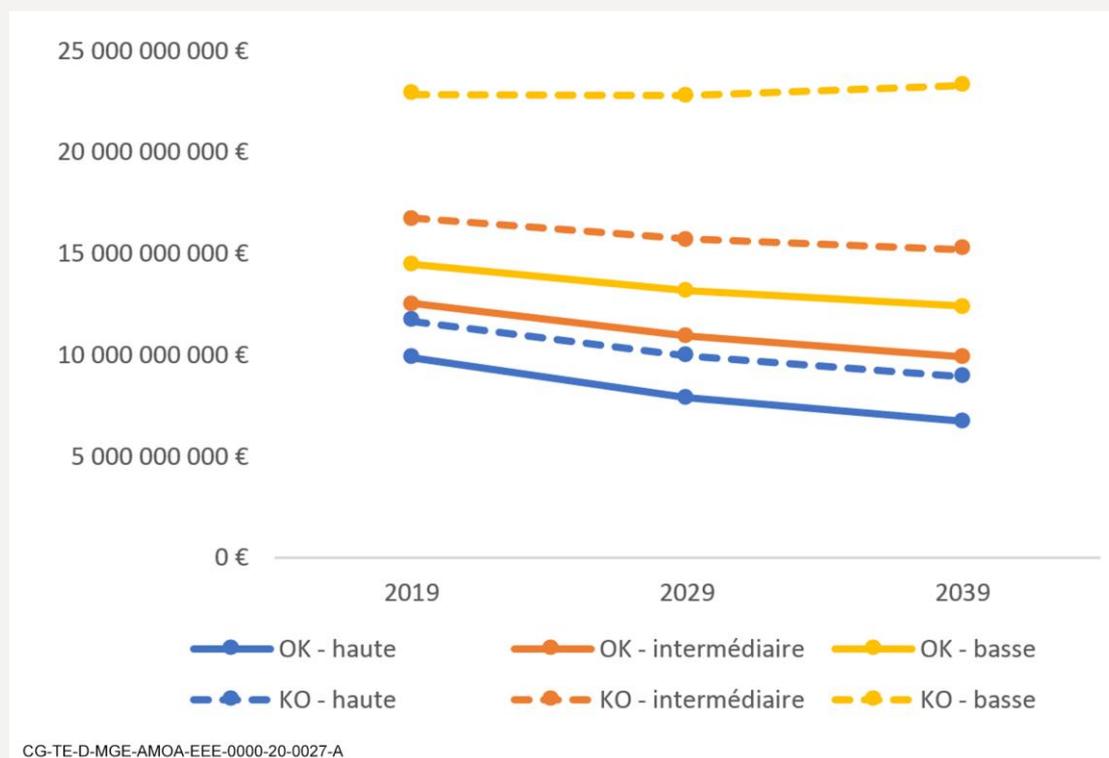


Figure 5.2-7

Coût actualisé de l'option de projet 1 et ses variantes (démarrage en 2029 ou 2039), selon le scénario et le taux d'actualisation

5.3 Coût de l'option 2

Rappelons que l'option 2 désigne une configuration où le décideur public lance la construction initiale du centre de stockage Cigéo, ainsi que la phase industrielle pilote, en vue de stocker des déchets MA-VL. En parallèle, le décideur public entreprend un effort en R&D ciblé sur les déchets HA, en vue de trouver une solution de mise en sécurité définitive autre que le stockage géologique profond. Cet effort dure jusqu'en 2070, date à laquelle une décision est prise quant à la solution de mise en sécurité définitive appropriée.

Plusieurs éventualités se présentent en 2070 en fonction des résultats de la R&D sur la technologie prospective (comprenant son site d'implantation) et du coût de ce nouveau mode de mise en sécurité définitive, comparé à celui du stockage géologique profond.

Au final dans l'option 2, on note que parmi les trois branches de l'arbre de décision, deux configurations de gestion sont possibles :

- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo (branches 2.1.a et 2.2) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, tandis que les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branches 2.1.b).

Comme pour l'option de projet 1, nous présentons les coûts bruts avec l'approche déterministe, puis en tenant compte de l'approche probabiliste, puis des prix relatifs, reflétant l'élasticité au PIB et enfin, en appliquant le système d'actualisation.

En complément, le lecteur peut se reporter à l'annexe 16 pour disposer de plus de détails et visualiser les représentations graphiques.

5.3.1 Coût brut de l'option 2

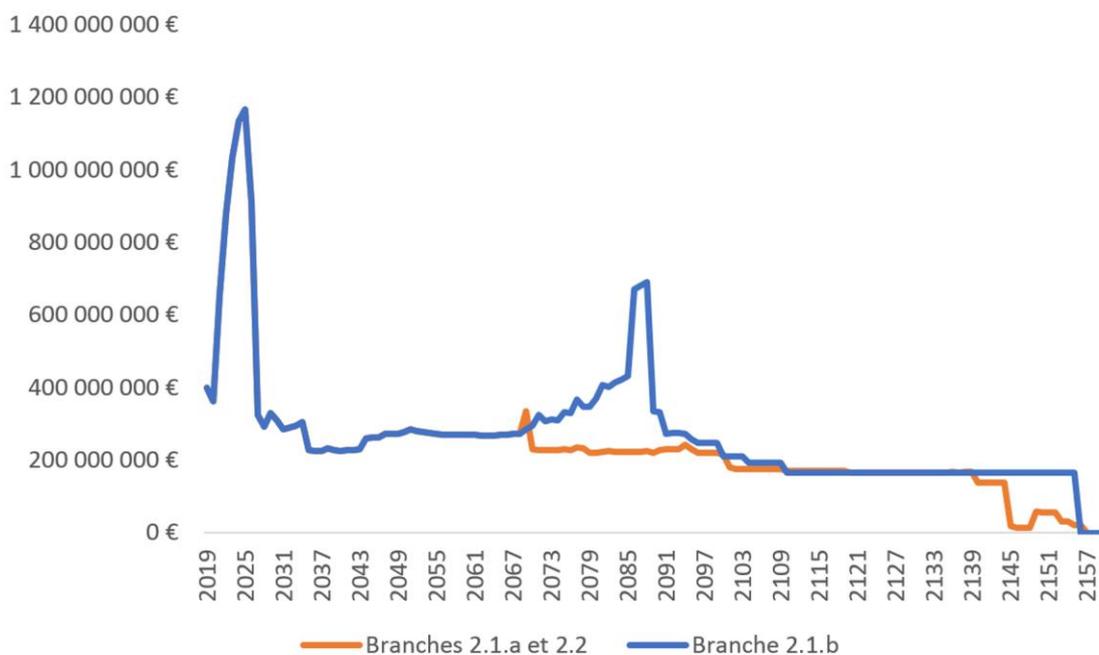
Le tableau ci-dessous compile les différents coûts unitaires des branches de l'option 2, selon les configurations de gestion :

Tableau 5.3-1 Coût brut de l'option 2, en €₂₀₁₉

Option 2	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective	
Coût de mise en place de Cigéo	25 811 M€	15 110 M€	11 626 M€ ⁶⁰
Coût de R&D	3 570 M€	3 570 M€	3 570 M€
Coût de recherche de site	1 653 M€	6 294 M€	1 653 M€

⁶⁰ Le coût de mise en place de Cigéo diffère dans cette option à partir de 2069 (et non 2070), en raison de la décision concernant la construction du bâtiment nucléaire de surface (EP2) destiné à la préparation des déchets HA. En effet, dans les branches 2.1.a et 2.2 de l'option 2, ce bâtiment est construit à partir de 2069. Nous supposons que le décideur public aura acquis assez d'information à cette date pour décider du lancement de sa construction ou non. Aussi, la branche dite « commune », diffère sur l'année 2069 pour ce cas précis. Le montant est ainsi de 11 677 M€ pour les branches 2.1.a et 2.2 et de 11 626 M€ pour la branche 2.1.b.

Option 2	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective	
Coût de technologie prospective	-	11 636 M€	-
Coût d'entreposage (surcoût par rapport à l'option de projet 1)	-	48 M€	-
Coût de transport	1 472 M€	1 472 M€	850 M€
Coût des GIP	420 M€	420 M€	420 M€
Coût brut total	32 926 M€	38 550 M€	18 119 M€



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0034-B

Figure 5.3-1 Chronique des coûts pour les trois branches de l'option 2

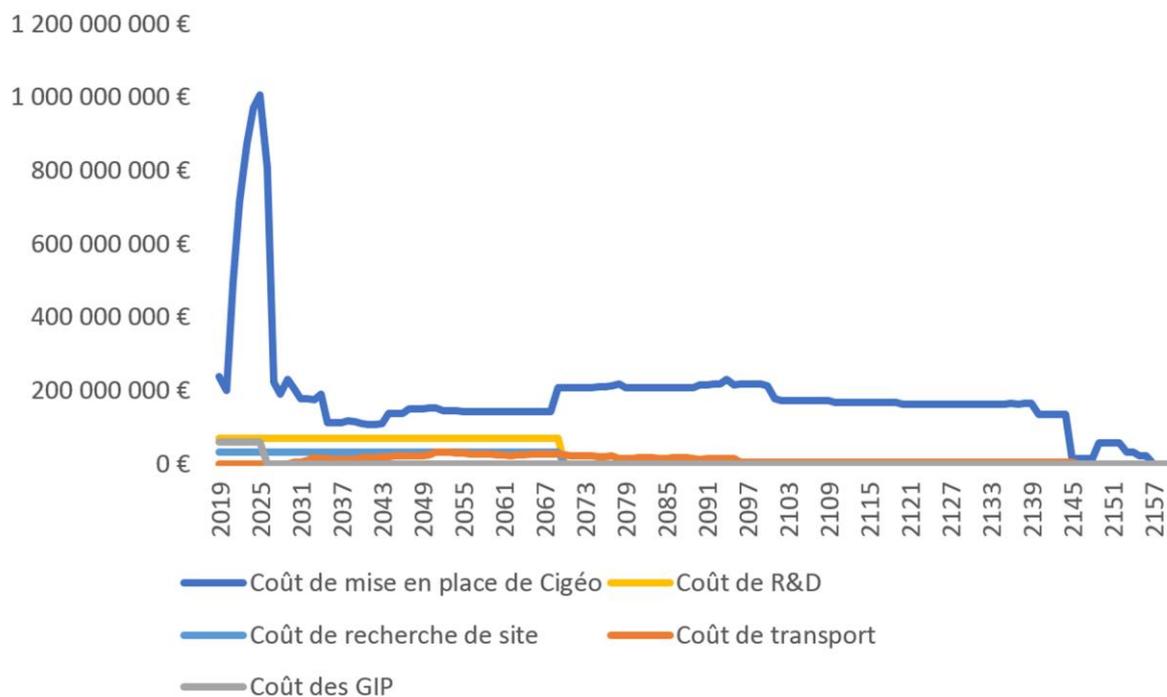


Figure 5.3-2 Chronique des coûts pour les branches 2.1.a et 2.2 de l'option 2

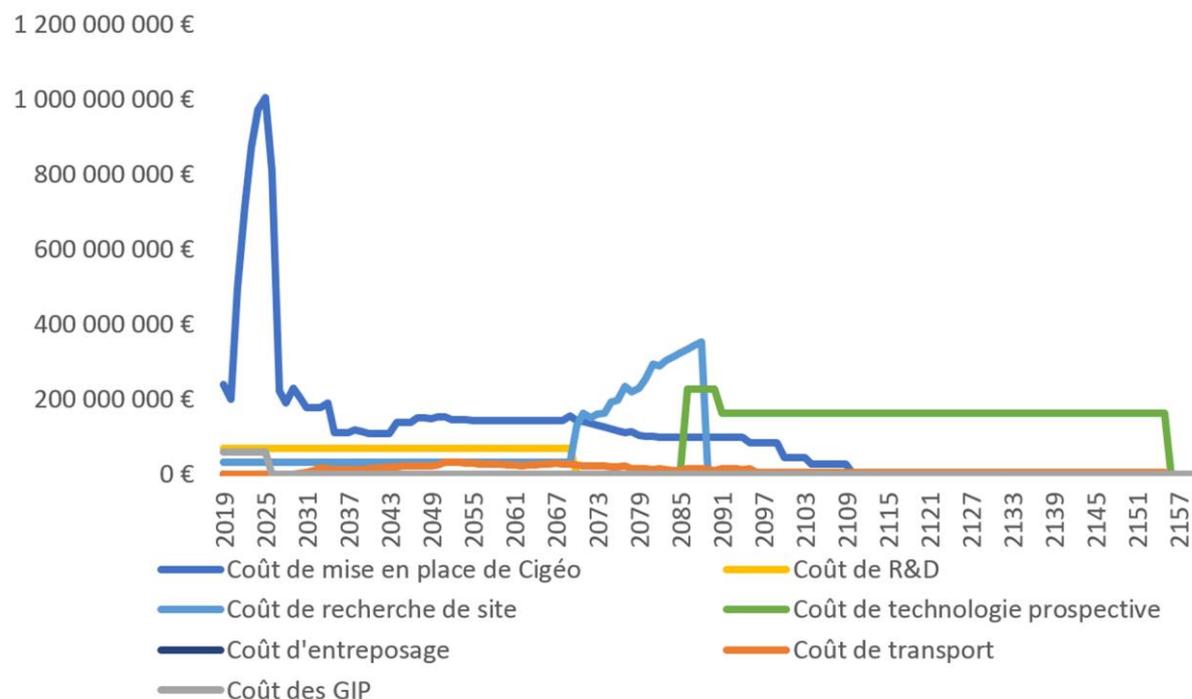
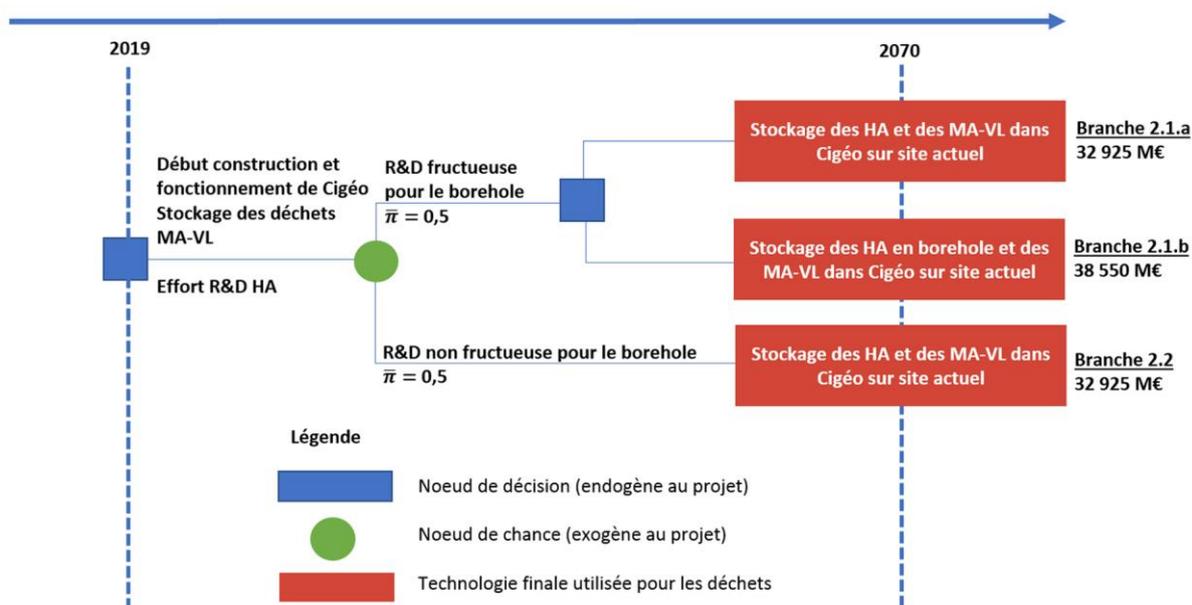


Figure 5.3-3 Chronique des coûts pour la branches 2.1.b de l'option 2



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0035-B

Figure 5.3-4 Coût des différentes branches de l'option 2

En déterministe, la valeur espérée de l'option 2 coûte 32 925 millions d'euros. La valeur espérée est ici la valeur de la branche la moins chère, et celle-ci est toujours disponible (elle n'est pas soumise à une probabilité de succès de R&D ou autre). Cette approche déterministe ne tient pas compte du caractère aléatoire des coûts, ni de l'évolution des prix relatifs, ni de l'actualisation.

5.3.2 Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option 2 et de l'évolution des prix relatifs

Pour tenir compte des plages de risque entourant la valeur de chacun des coûts unitaires, une simulation de Monte-Carlo de 10 000 tirages est réalisée.

De plus, comme pour l'option de projet 1, des prix relatifs sont appliqués aux coûts bruts de l'option 2, pour tenir compte des élasticités des différents coûts à l'évolution du PIB, lequel varie sensiblement en fonction des *scenarii*.

Les résultats de la prise en compte de l'aléa et des prix relatifs sont présentés ci-dessous en scénario OK et en scénario KO, pour les différentes valeurs des élasticités déterminées au chapitre 3.2.3.2 du présent document.

Tableau 5.3-2 Coût des branches de l'option 2 en tenant compte des aléas sur les coûts et de l'évolution des prix relatifs, en €₂₀₁₉

Coût de l'option 2 avec l'aléa sur les coûts et les prix relatifs, en € ₂₀₁₉			
Choix de gestion pour les MA-VL		Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA			Technologie prospective
Option 2	Taux d'actualisation	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b
OK	Haut	107 473 M€	130 325 M€
	Intermédiaire	63 060 M€	75 057 M€
	Bas	40 129 M€	46 880 M€
KO	Haut	57 418 M€	67 280 M€
	Intermédiaire	47 190 M€	55 217 M€
	Bas	39 107 M€	45 653 M€

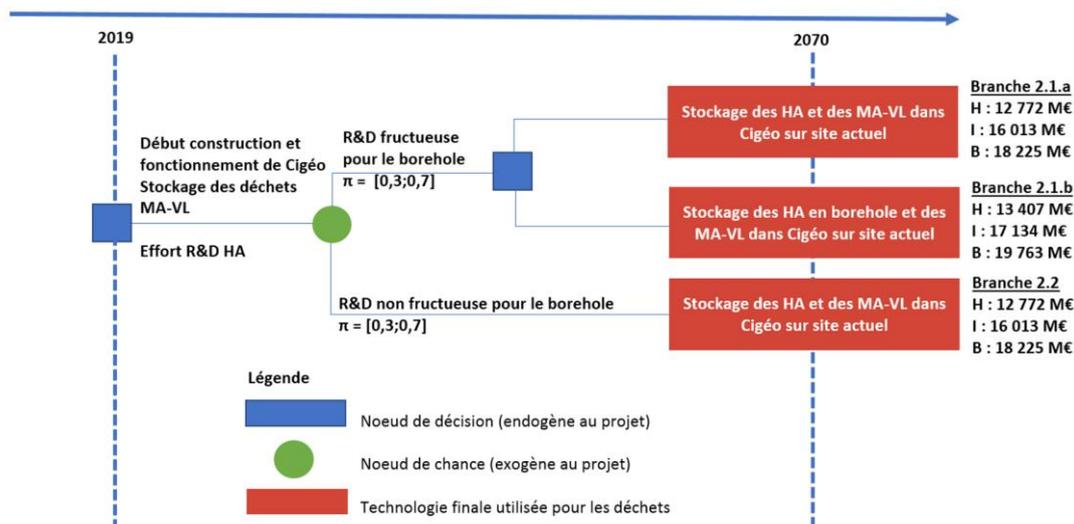
En prenant en compte l'évolution des prix relatifs, et avant actualisation, il ressort que la mise en place de Cigéo pour les déchets HA et MA-VL (branches 2.1.a et 2.2.) reste moins onéreuse que la mise en place de la technologie de forage profond (borehole) pour les HA si celle-ci est trouvée (branche 2.1.b).

5.3.3 Coût actualisé de l'option 2 et espérance

Enfin, nous présentons les coûts actualisés de l'option 2, c'est-à-dire en tenant compte de l'effet du temps long. Pour ce faire, des taux d'actualisation différenciés sont mobilisés selon le scénario OK ou KO, comportant une borne haute, une borne intermédiaire et une borne basse. Les valeurs de ces taux sont explicités au chapitre 3.3.2 du présent document.

5.3.3.1 Scénario OK

Les résultats de l'option 2 actualisés du scénario OK sont présentés dans la Figure ci-dessous, pour la borne haute (H), la borne basse (B) et la borne intermédiaire (I) du taux d'actualisation. Ils tiennent compte de l'aléa sur les coûts bruts et de l'évolution des prix relatifs.

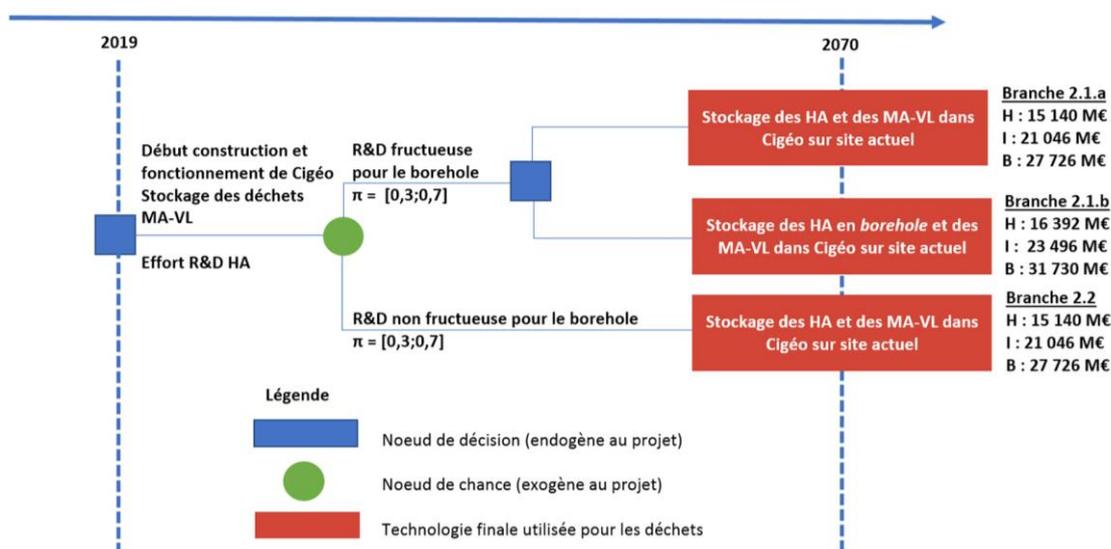


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0039-B

Figure 5.3-5 Résultats des branches de l'option 2, pour la borne haute, basse et intermédiaire du taux d'actualisation, scénario OK

On observe que, après actualisation, il est toujours préférable de mettre en œuvre Cigéo, quel que soit le taux d'actualisation choisi. L'espérance de l'option est alors tout simplement égale au coût des branches les moins chères, c'est-à-dire les branches 2.1.a et 2.2, soit 12 771 millions d'euros avec la borne haute du taux d'actualisation, 18 225 millions d'euros avec la borne basse et 16 013 millions d'euros avec la borne intermédiaire.

5.3.3.2 Scénario KO



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0040-B

Figure 5.3-6 Résultats des branches de l'option 2, pour la borne haute, basse et intermédiaire du taux d'actualisation, scénario KO

Comme en scénario OK, il est toujours préférable de mettre en œuvre Cigéo (branches 2.1.a et 2.2) plutôt que la technologie prospective en scénario KO. Le risque associé à ce choix est important, comme en scénario OK.

5.3.4 Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1

Une fois l'espérance des branches de l'option 2 calculée, nous pouvons comparer cette option à l'option de projet 1. On observe que quel que soit le scénario et quelle que soit la borne du taux d'actualisation retenue, l'option de projet 1 est toujours moins coûteuse que l'option 2.

Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu du fait que dans l'option 2, en parallèle de la construction initiale du centre de stockage Cigéo, un investissement conséquent en R&D est consenti pour trouver une technologie prospective pour le stockage des déchets HA, qui d'ailleurs ne présente pas de bénéfice supplémentaire par rapport à l'option de projet 1.

Tableau 5.3-3 *Récapitulatif du coût de l'option de projet 1 et de l'espérance de l'option 2, en fonction des taux d'actualisation et scénarii*

Option	Espérance du coût actualisé en scénario OK	Espérance du coût actualisé en scénario KO
Option de projet 1	H : 9 836 M€	H : 11 646 M€
	B : 14 482 M€	B : 22 835 M€
	I : 12 544 M€	I : 16 741 M€
Option 2	H : 12 771 M€	H : 15 140 M€
	B : 18 225 M€	B : 27 726 M€
	I : 16 013 M€	I : 21 046 M€

H : taux d'actualisation haut ; I : taux d'actualisation intermédiaire ; B : taux d'actualisation bas

5.3.4.1 Scénario OK

La réalisation de simulations Monte-Carlo sur la différence entre le coût de l'option de projet 1 et l'espérance de coût de l'option 2 nous permet de (i) estimer le delta de coût moyen entre les deux options et (ii) estimer le pourcentage de chance que l'option de projet 1 soit moins chère que l'option 2.

- avec le taux d'actualisation élevé, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 2 935 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas.
- avec un taux d'actualisation intermédiaire, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 3 469 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas ;
- avec un taux d'actualisation bas, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 3 743 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas ;

5.3.4.2 Scénario KO

La différence entre le coût de l'option de projet 1 et l'espérance de coût de l'option 2 indique que :

- avec le taux d'actualisation haut, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 3 494 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas ;

- avec un taux d'actualisation intermédiaire, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 4 305 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas ;
- avec un taux d'actualisation faible, l'option de projet 1 coûtera en moyenne 4 891 millions d'euros de moins que l'espérance de l'option 2. L'option de projet 1 sera moins chère que l'option 2 dans 100 % des cas.

5.4 Coût de l'option 3

Rappelons que l'option 3 consiste à entreprendre la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo, et en parallèle, à investir dans la recherche jusqu'en 2070 en vue de trouver une technologie prospective pour les HA et pour les MA-VL.

Au final dans l'option 3, on note ainsi que parmi les six branches de l'arbre de décision, trois configurations de gestion sont possibles :

- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branche 3.1.a) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, tandis que les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective (branches 3.1.c et 3.2.a) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo (branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3).

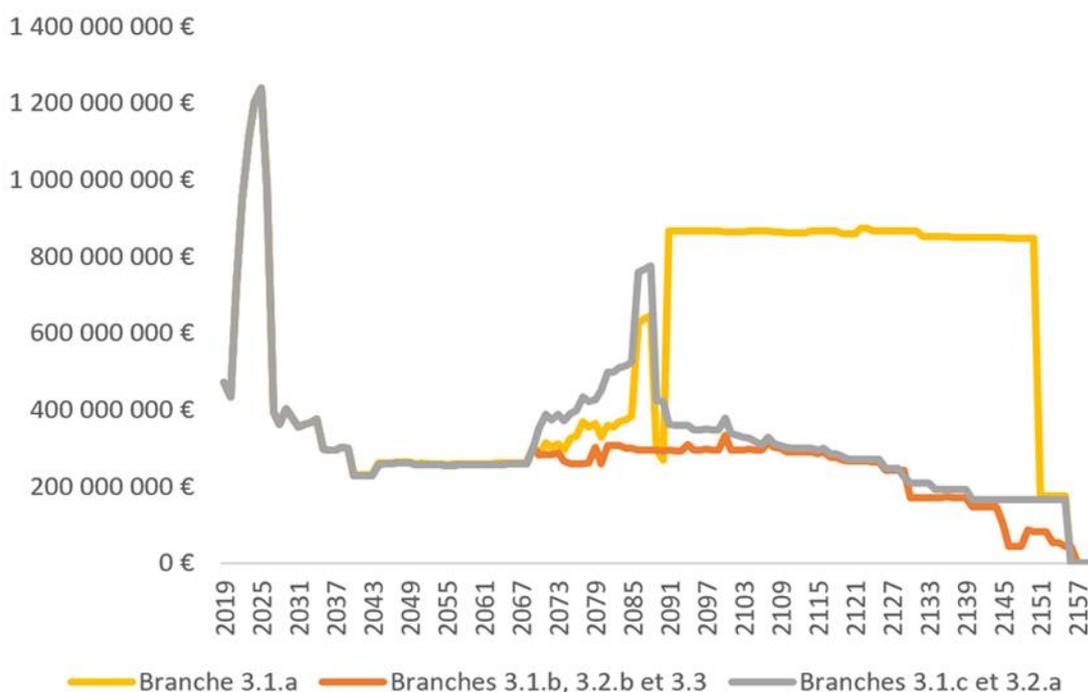
Les différentes catégories de coûts sont détaillées ci-après. En complément, le lecteur peut se reporter à l'annexe 17 pour disposer de plus de détails et visualiser les représentations graphiques.

5.4.1 Coût brut de l'option 3

Selon les différentes branches, le coût brut des branches de l'option 3 peut se résumer ainsi :

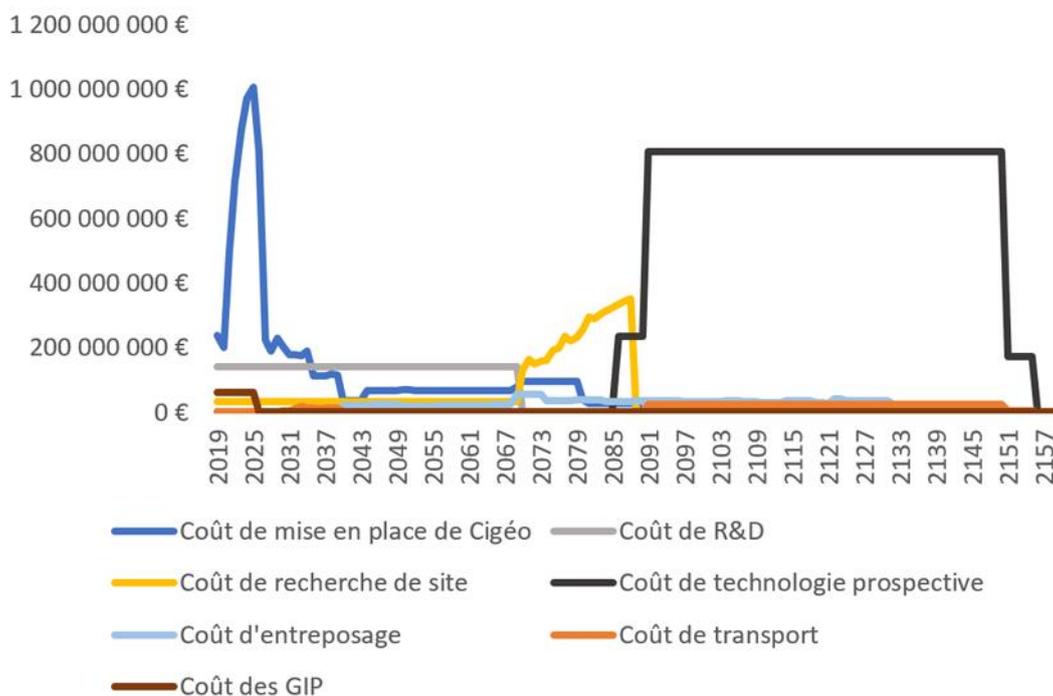
Tableau 5.4-1 Coût brut de l'option 3, en €₂₀₁₉

Option 3	Branche 3.1.a	Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Branches 3.1.c et 3.2.a	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les MA-VL	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	
Choix de gestion pour les HA			Technologie prospective	
Coût de mise en place de Cigéo	10 571 M€	26 737 M€	16 813 M€	9 322 M€
Coût de R&D	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€
Coût de recherche de site	6 294 M€	1 653 M€	6 294 M€	1 653 M€
Coût de technologie prospective	50 436 M€	-	11 636 M€	-
Coût d'entreposage (surcoût par rapport à l'option de projet 1)	3 243 M€	2 103 M€	2 150 M€	589 M€
Coût de transport	1 582 M€	1 472 M€	1 472 M€	110 M€
Coût des GIP	420 M€	420 M€	420 M€	420 M€
Coût brut total	79 686 M€	39 525 M€	45 925 M€	19 234 M€



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0041-B

Figure 5.4-1 Chronique du coût brut des 6 branches de l'option 3, regroupées en 3 branches distinctes, en €₂₀₁₉



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0030-A

Figure 5.4-2 Chronique du coût brut de la branche 3.1.a de l'option 3, en €₂₀₁₉

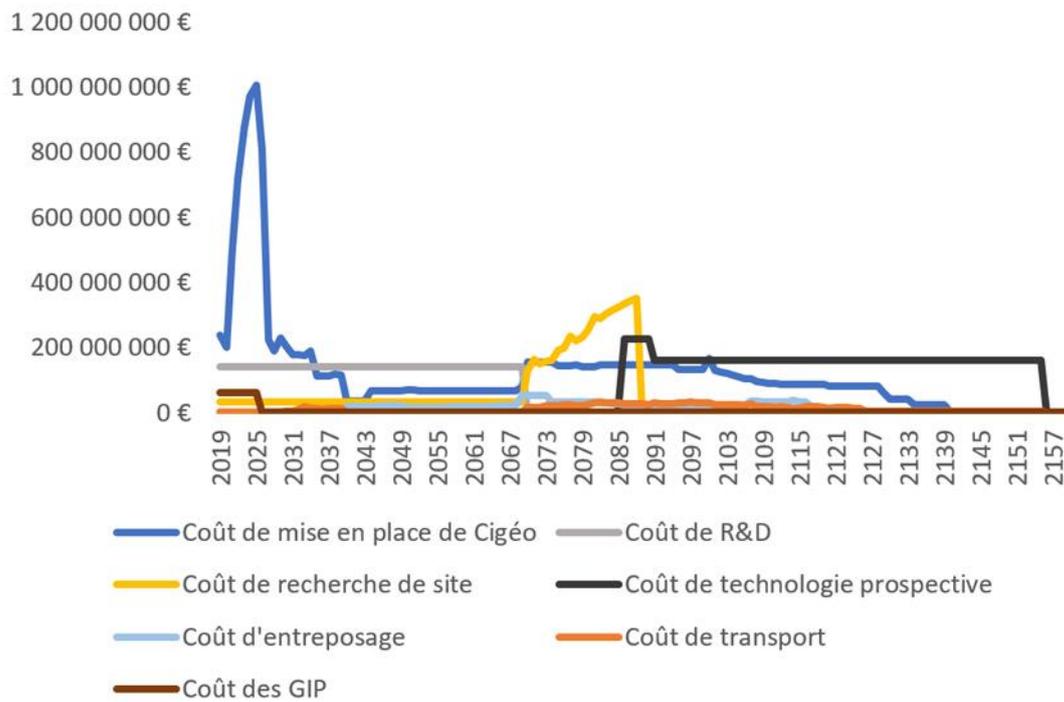


Figure 5.4-3 Chronique du coût brut des branches 3.1.c et 3.2.a de l'option 3, en €₂₀₁₉

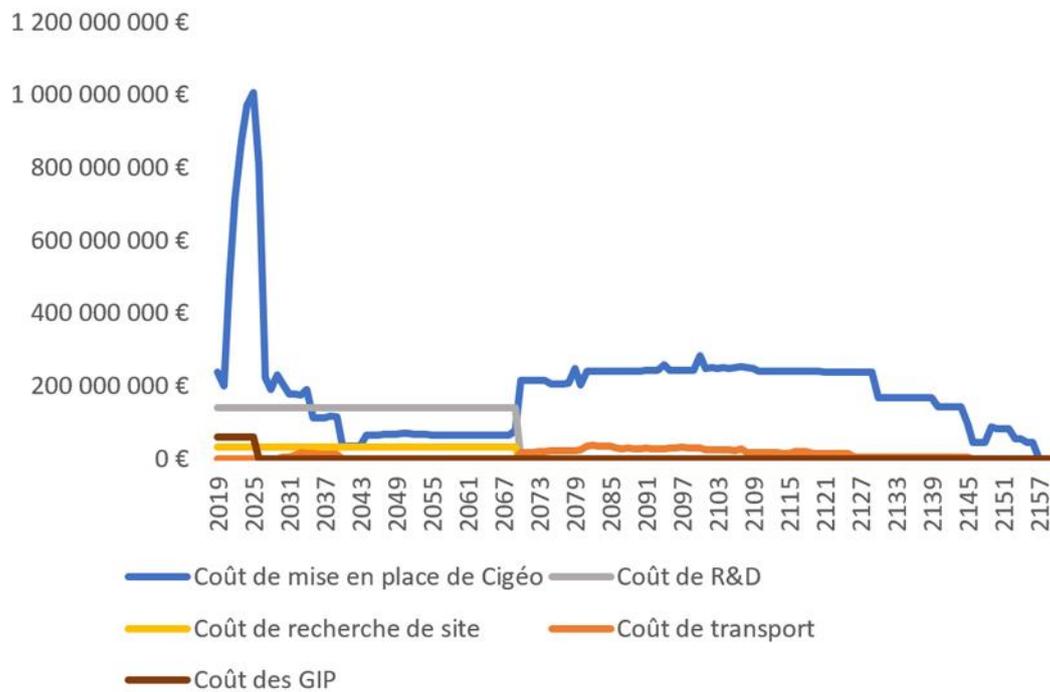


Figure 5.4-4 Chronique du coût brut des branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 de l'option 3, en €₂₀₁₉

5.4.2 Prise en compte du risque d'aléa sur les coûts de l'option 3 et de l'évolution des prix relatifs

En appliquant aux coûts unitaires les distributions possibles concernant les aléas sur les coûts (approche probabiliste, basée sur une simulation de Monte-Carlo avec 10 000 tirages) et les évolutions dans le temps (élasticité des prix par rapport au PIB), nous obtenons les résultats par branche présentés dans les arbres ci-dessous.

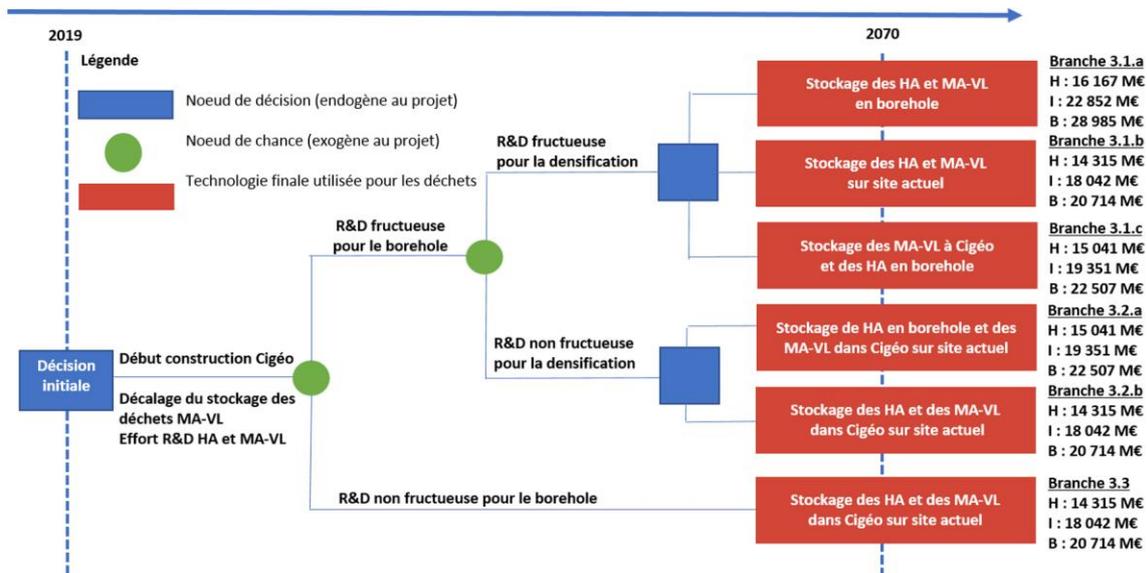
Tableau 5.4-2 Coût simulé des branches de l'option 3 en tenant compte de l'aléa des coûts et de l'évolution des prix relatifs, en €₂₀₁₉

Coût de l'option 3 avec prise en compte de l'aléa sur les coûts et des prix relatifs, en € ₂₀₁₉				
Choix de gestion pour les MA-VL		Technologie prospective	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA				Technologie prospective
Scénario	Taux d'actualisation	Branche 3.1.a	Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Branches 3.1.c et 3.2.a
OK	Haut	382 288 M€	136 972 M€	162 395 M€
	Intermédiaire	190 214 M€	78 136 M€	91 755 M€
	Bas	100 294 M€	48 319 M€	56 030 M€
KO	Haut	151 991 M€	69 594 M€	81 052 M€
	Intermédiaire	120 192 M€	56 925 M€	66 180 M€
	Bas	95 574 M€	46 960 M€	54 449 M€

5.4.3 Coût actualisé de l'option 3 et espérance

Les résultats d'une simulation de Monte-Carlo de 10 000 tirages, avec prise en compte des aléas sur les coûts bruts, de l'évolution des prix relativement au PIB et du temps long (actualisation) sont présentés ci-après, pour chaque scénario, et avec les bornes haute (H), basse (B) et intermédiaire (I) du taux d'actualisation.

5.4.3.1 Scénario OK



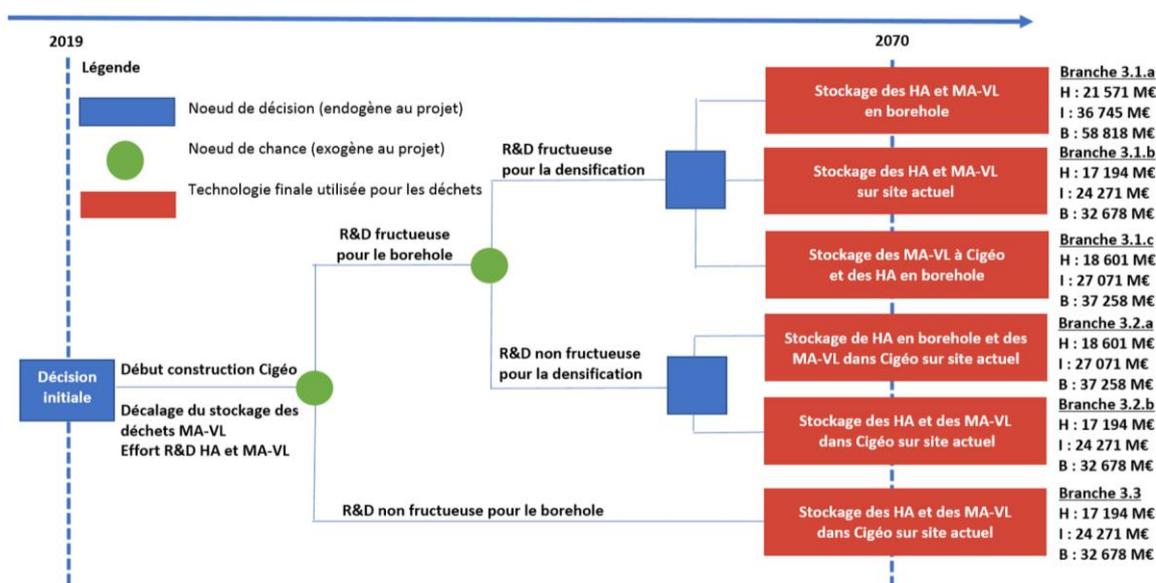
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0043-B

Figure 5.4-5 Résultats des branches de l'option 3, pour les bornes haute, intermédiaire et basse du taux d'actualisation, scénario OK

Quel que soit le taux d'actualisation mobilisé – haut, intermédiaire ou bas -, il est toujours préférable de stocker les déchets HA et MA-VL au sein de Cigéo, plutôt que de mobiliser une technologie prospective, même si la R&D est fructueuse. L'espérance de la branche est donc tout simplement égale au coût des branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3, puisque la branche qui présente le coût actualisé le plus faible est toujours disponible. La valeur de cette branche est égale à :

- 14 315 millions d'euros avec le taux d'actualisation élevé ;
- 18 042 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire ;
- 20 714 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas.

5.4.3.2 Scénario KO



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0044-B

Figure 5.4-6 Résultats des branches de l'option 3, pour les bornes haute, intermédiaire et basse du taux d'actualisation, scénario KO

Comme pour le scénario OK, la décision optimale est toujours de mettre en place le stockage géologique profond Cigéo pour les déchets HA et MA-VL, quel que soit le taux d'actualisation. L'espérance de la branche est donc tout simplement égal au coût des branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3, soit :

- 17 194 millions d'euros avec le taux d'actualisation élevé ;
- 24 271 millions d'euros avec le taux d'actualisation intermédiaire ;
- 32 678 millions d'euros avec le taux d'actualisation bas.

5.4.4 Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1

Tableau 5.4-3 Récapitulatif du coût de l'option de projet 1 et de l'espérance de l'option 3, en fonction des taux d'actualisation et scénarii

Option	Espérance du coût actualisé, scénario OK	Espérance du coût actualisé, scénario KO
Option de projet 1	H : 9 836 M€ B : 14 482 M€ I : 12 544 M€	H : 11 646 M€ B : 22 835 M€ I : 16 741 M€
Option 3	H : 14 315 M€ B : 20 714 M€ I : 18 042 M€	H : 17 194 M€ B : 32 678 M€ I : 24 271 M€

H : taux d'actualisation haut ; I : taux d'actualisation intermédiaire ; B : taux d'actualisation bas

Cette option 3 est très largement battue par l'option de projet 1 dans le scénario OK. Qu'un taux d'actualisation élevé, intermédiaire ou bas soit utilisé, l'option de projet 1 est moins chère que l'espérance de projet 3 dans 100 % des 10 000 tirages effectués ; le delta s'élève, en moyenne, à 4 479 millions d'euros avec un taux d'actualisation élevé, 5 498 millions d'euros avec un taux d'actualisation intermédiaire et 6 232 millions d'euros avec un taux d'actualisation faible.

Comme en scénario OK, l'option 3 est très largement battue par l'option de projet 1 en scénario KO. Le delta est en faveur de l'option de projet 1 dans 100 % des cas, quel que soit le taux d'actualisation utilisé, s'élève en moyenne à 5 548 millions d'euros avec un taux d'actualisation élevé, 7 530 millions d'euros avec un taux d'actualisation intermédiaire et 9 843 millions d'euros avec un taux d'actualisation faible.

5.5 Coût de l'option 4

Rappelons que dans l'option 4, la configuration est celle d'un décideur public qui considère un report des premiers investissements du centre de stockage Cigéo et qui lance à la place des investissements de R&D pour tenter de trouver une solution prospective alternative de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL. Le décideur public fait donc le choix de ne pas réaliser le centre de stockage Cigéo dans l'immédiat, et accepte de faire face au double risque portant sur l'issue de la R&D et sur le maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne.

Au final dans l'option 4, on note ainsi que parmi les douze branches de cet arbre de décision, huit configurations de gestion distinctes se présentent :

- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo à partir de 2080 (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 et les déchets HA sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne à partir de 2080 (branche 4.1.b) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne à partir de 2080 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.1.c et 4.3.b) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.1.d et 4.2) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2100 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.4) ;
- soit les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2080 (branche 4.5) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2100 (branche 4.7) ;
- soit tous les déchets sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 (branche 4.8).

Les différentes catégories de coûts sont détaillées ci-après. En complément, le lecteur peut se reporter à l'annexe 18 pour disposer de plus de détails et visualiser les représentations graphiques.

5.5.1 Coût brut de l'option 4

Le coût brut (déterministe) des différentes branches de l'option 4 sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 5.5-1 Coût brut de l'option 4, en €₂₀₁₉

Option 4	Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6	Branche 4.1.b	Branches 4.1.c et 4.3.b	Branches 4.1.d et 4.2	Branche 4.4	Branche 4.5	Branche 4.7	Branche 4.8
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Technologie prospective	Stockage géologique profond sur nouveau site	Entreposage de longue durée renouvelé	Stockage géologique profond sur nouveau site	Entreposage de longue durée renouvelé
Choix de gestion pour les HA		Stockage géologique profond	Technologie prospective		Technologie prospective	Technologie prospective		
Coût de mise en place de Cigéo	25 518 M€	16 183 M€	14 909 M€	-	14 909 M€	-	25 518 M€	-
Coût de R&D	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€	7 140 M€
Coût de recherche de site	1 653 M€	6 294 M€	6 294 M€	6 294 M€	10 283 M€	7 644 M€	5 642 M€	3 003 M€
Coût de technologie prospective	-	39 798 M€	11 784 M€	50 436 M€	11 784 M€	11 784 M€	-	-
Coût d'entreposage (surcoût par rapport à l'option de projet 1)	3 203 M€	3 804 M€	3 203 M€	3 804 M€	5 453 M€	29 780 M€	5 960 M€	35 452 M€
Coût de transport	1 472 M€	1 472 M€	1 472 M€	1 472 M€	1 472 M€	231 M€	1 472 M€	-

Quantification des coûts des différentes options

Option 4	Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6	Branche 4.1.b	Branches 4.1.c et 4.3.b	Branches 4.1.d et 4.2	Branche 4.4	Branche 4.5	Branche 4.7	Branche 4.8
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Technologie prospective	Stockage géologique profond sur nouveau site	Entreposage de longue durée renouvelé	Stockage géologique profond sur nouveau site	Entreposage de longue durée renouvelé
Choix de gestion pour les HA		Stockage géologique profond	Technologie prospective		Technologie prospective	Technologie prospective		
Coût des GIP	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€	1 740 M€
Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€	1 652 M€
Coût de maintien des compétences	1 224 M€	1 224 M€	1 224 M€	1 224 M€	1 944 M€	13 968 M€	1 944 M€	13 968 M€
Coût brut total	43 602 M€	79 305 M€	49 418 M€	73 762 M€	56 378 M€	73 940 M€	51 068 M€	62 955 M€

Les chroniques des différents paramètres de coûts de l'ensemble des branches sont présentés ci-dessous (l'Annexe 18 fournit les détails de calcul des coûts unitaires, ainsi que leurs chroniques et propose des représentations graphiques).

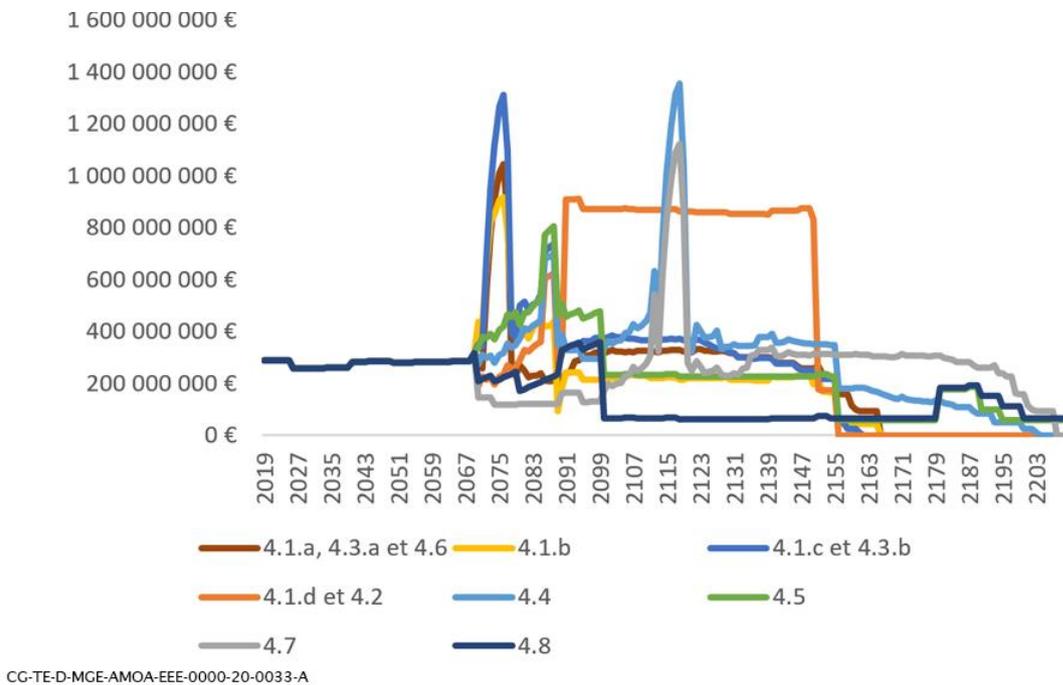


Figure 5.5-1 Chronique du coût brut de l'ensemble des branches de l'option 3, jusqu'en 2110, regroupés par branche distincte, en €₂₀₁₉

- **Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6** : dans ces branches, tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond et sont stockés dans le centre de stockage Cigéo à partir de 2080.

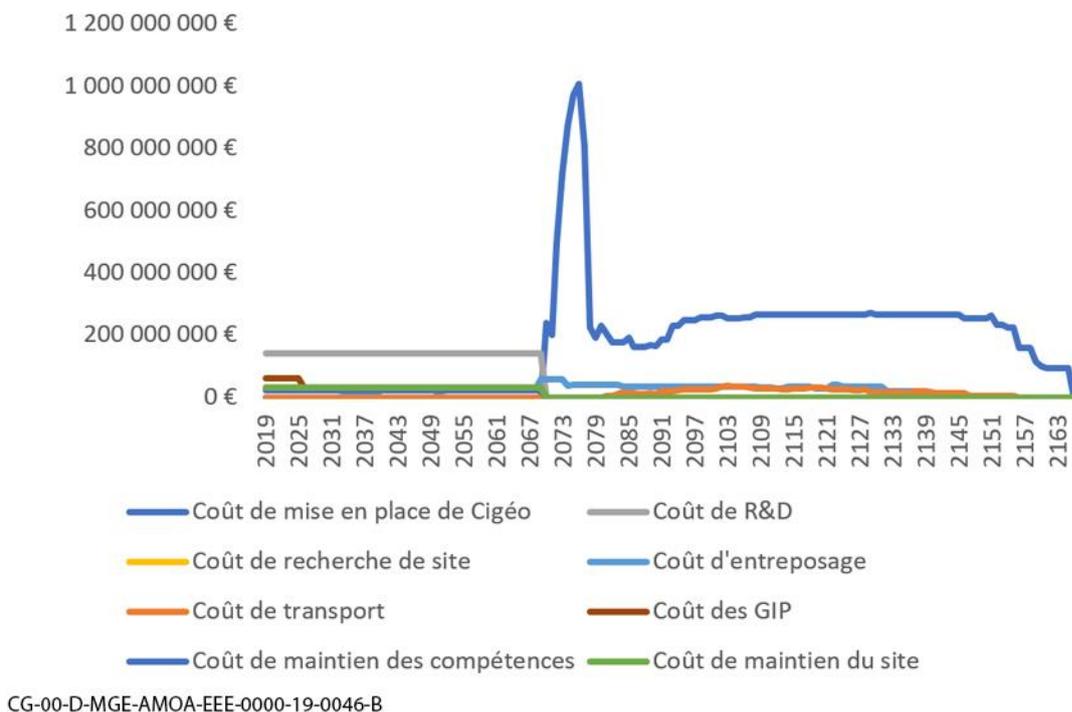
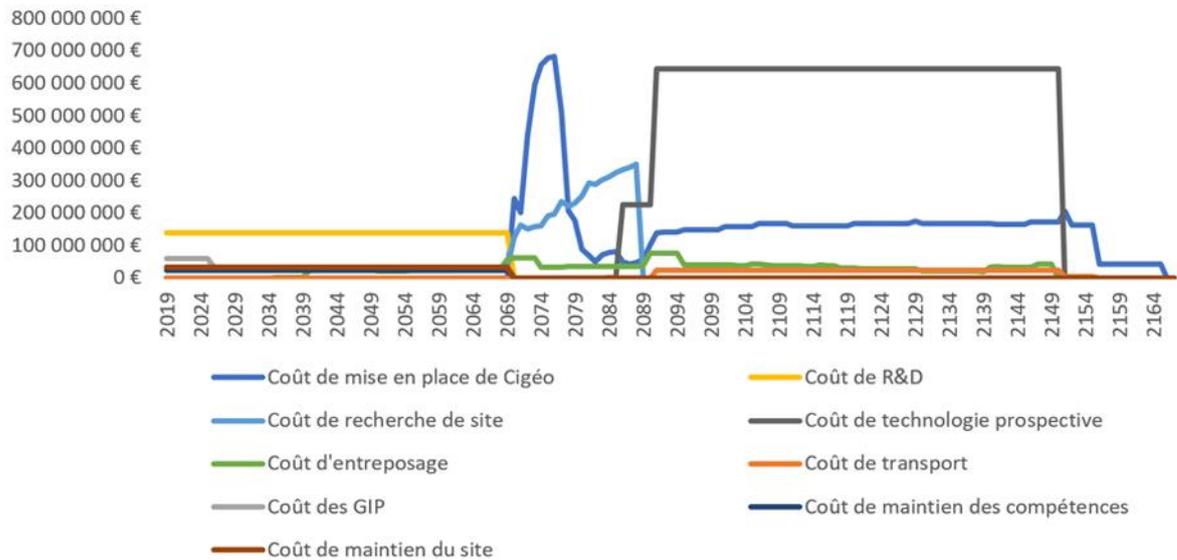


Figure 5.5-2 Chronique du coût des branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6, par type de coût

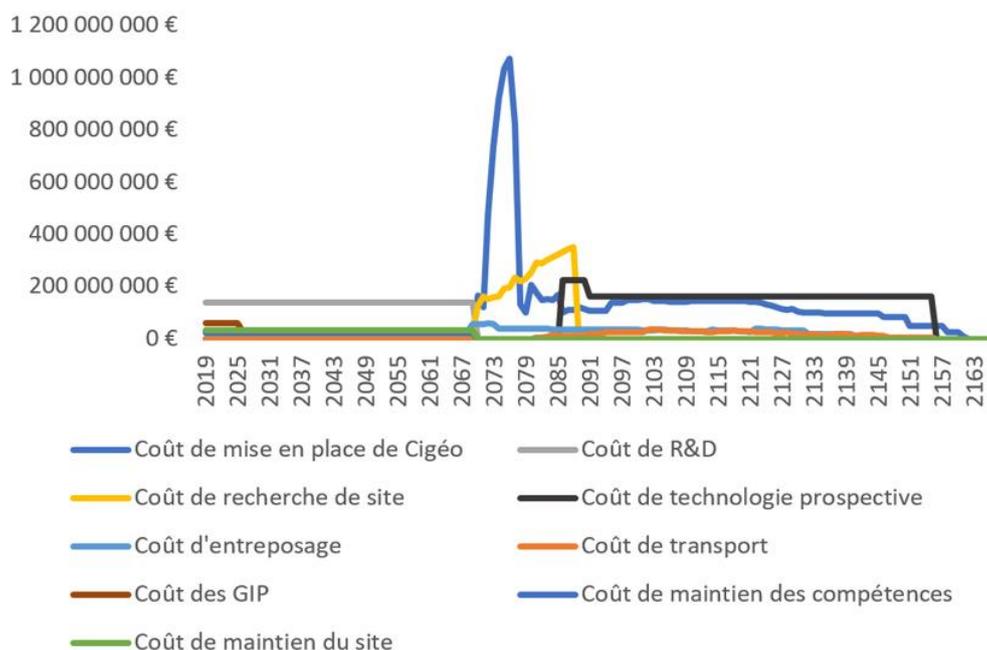
- **Branche 4.1.b :** dans cette branche, les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2091 et les déchets HA sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo sur le site Meuse/Haute-Marne à partir de 2080.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0047-B

Figure 5.5-3 Chronique du coût de la branche 4.1.b, par type de coût

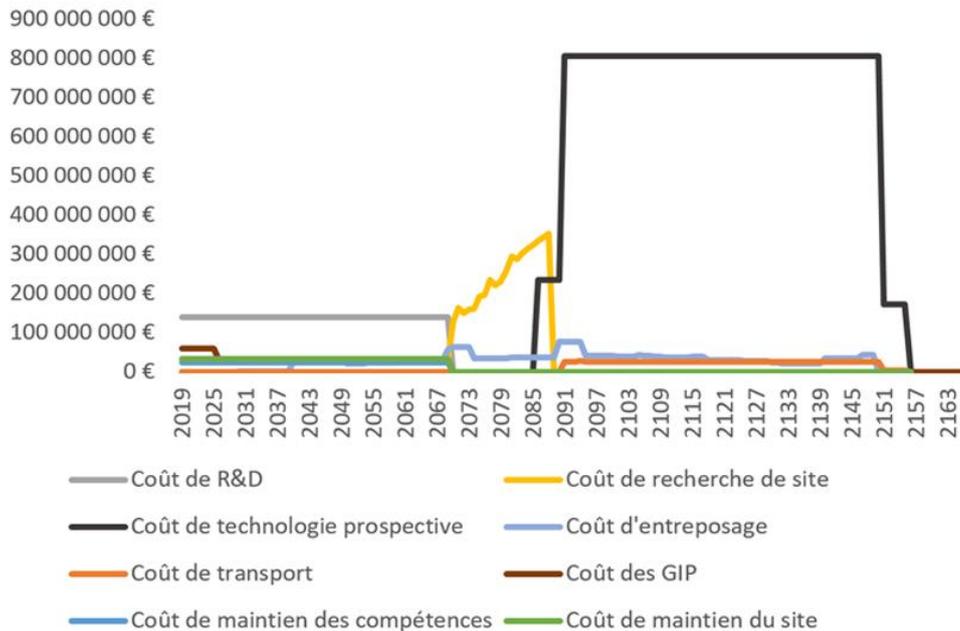
- **Branches 4.1.c et 4.3.b :** dans ces branches, les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo sur le site Meuse/Haute-Marne à partir de 2080 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2091.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0048-B

Figure 5.5-4 Chronique du coût des branches 4.1.c et 4.3.b, par type de coûts

- **Branches 4.1.d et 4.2** : dans ces branches, tous les déchets sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2091.

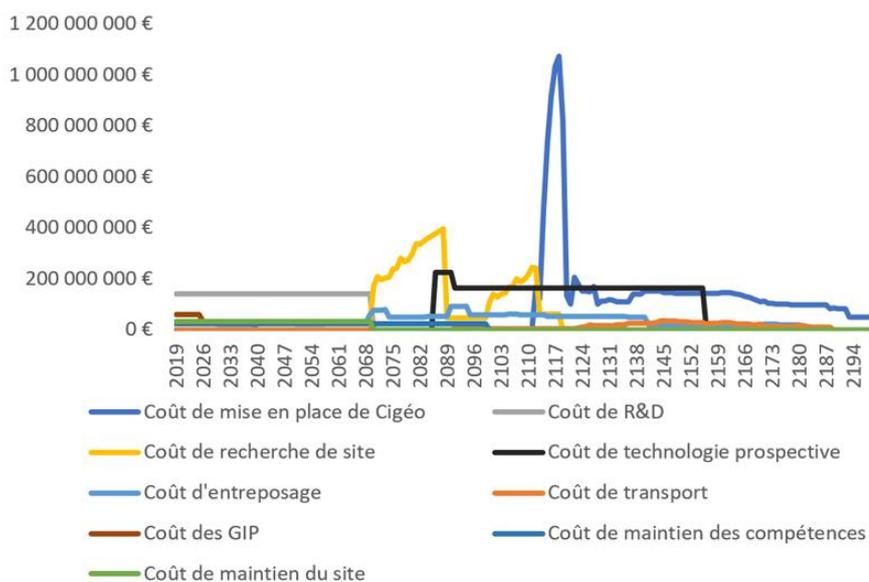


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0049-B

Figure 5.5-5 Chronique du coût des branches 4.1.d et 4.2, par type de coûts

Dans ces branches, les déchets HA et MA-VL sont stockés au sein d'une technologie prospective à partir de 2091. On note ainsi d'importants coûts de fonctionnement entre 2091 et 2150 pour les MA-VL, qui alourdissent considérablement le coût de ces branches.

- **Branche 4.4** : dans cette branche, les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2122 et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2091.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0050-B

Figure 5.5-6 Chronique du coût de la branche 4.4, par type de coûts

Cette branche présente des coûts élevés de recherche de site, puisqu'une séquence est réalisée pour rechercher un site pour les HA en lien avec une technologie prospective, et une séquence pour chercher un nouveau site de stockage géologique profond à partir de 2070 pour les déchets MA-VL.

- **Branches 4.5 :** dans cette branche, les déchets MA-VL sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 et jusqu'à la fin de la période d'étude (2600) et les déchets HA sont gérés en ayant recours à la technologie prospective à partir de 2091.

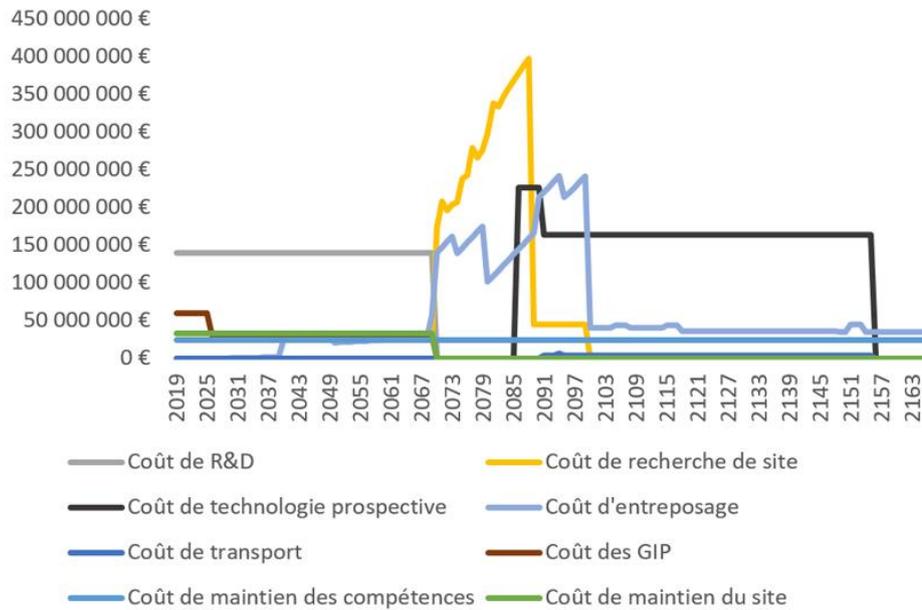


Figure 5.5-7 Chronique du coût de la branche 4.5 par type de coût, jusqu'à 2165

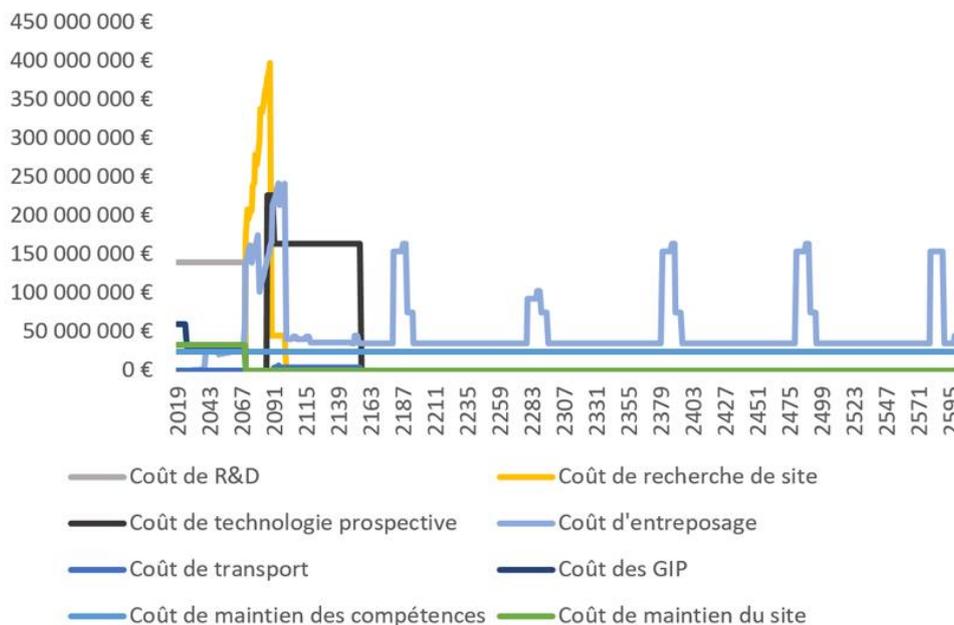


Figure 5.5-8 Chronique du coût de la branche 4.5 par type de coût, jusqu'en 2600

- **Branche 4.7 :** dans cette branche, tous les déchets sont gérés en ayant recours au stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2122.

Les chroniques des différentes catégories de coûts sont représentées ci-après.

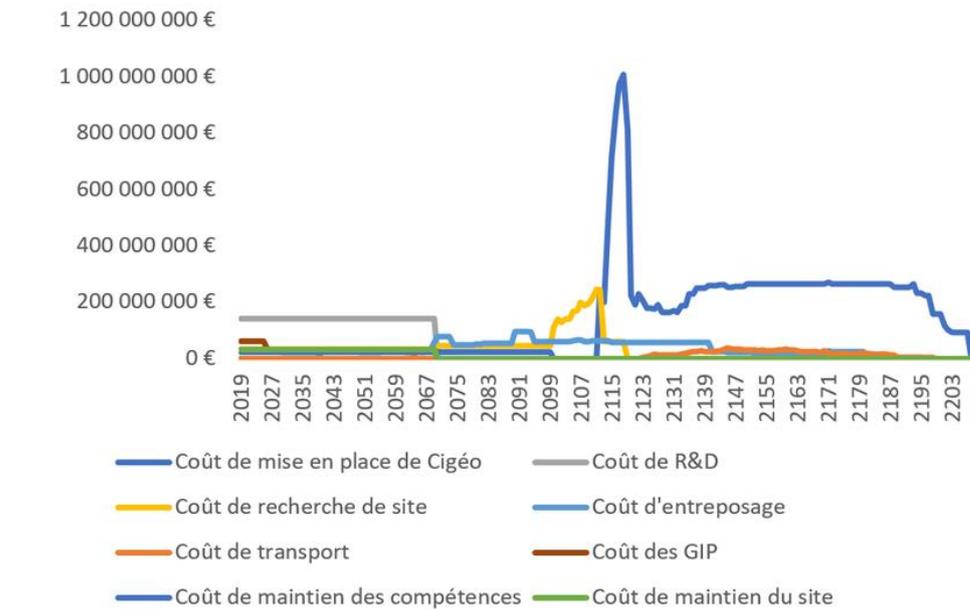


Figure 5.5-9 Chronique du coût de la branche 4.7 par type de coût

- **Branche 4.8 :** dans ces branches, tous les déchets sont gérés en ayant recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2100 ; la R&D n'a été fructueuse ni pour les HA, ni pour les MA-VL, le site de Meuse/Haute-Marne a été perdu, et, malgré 30 ans de recherches lancées en 2070, aucun site alternatif n'a été identifié.

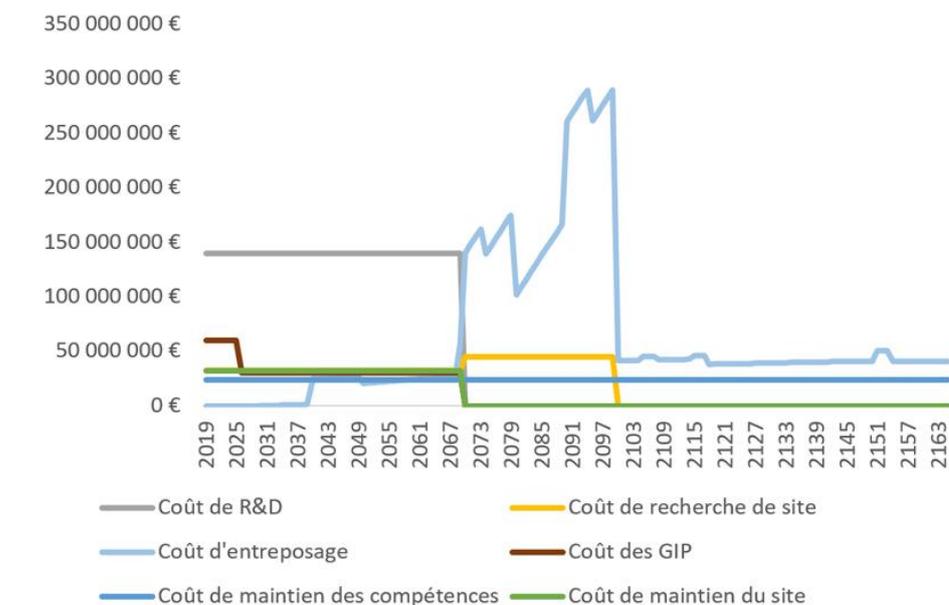
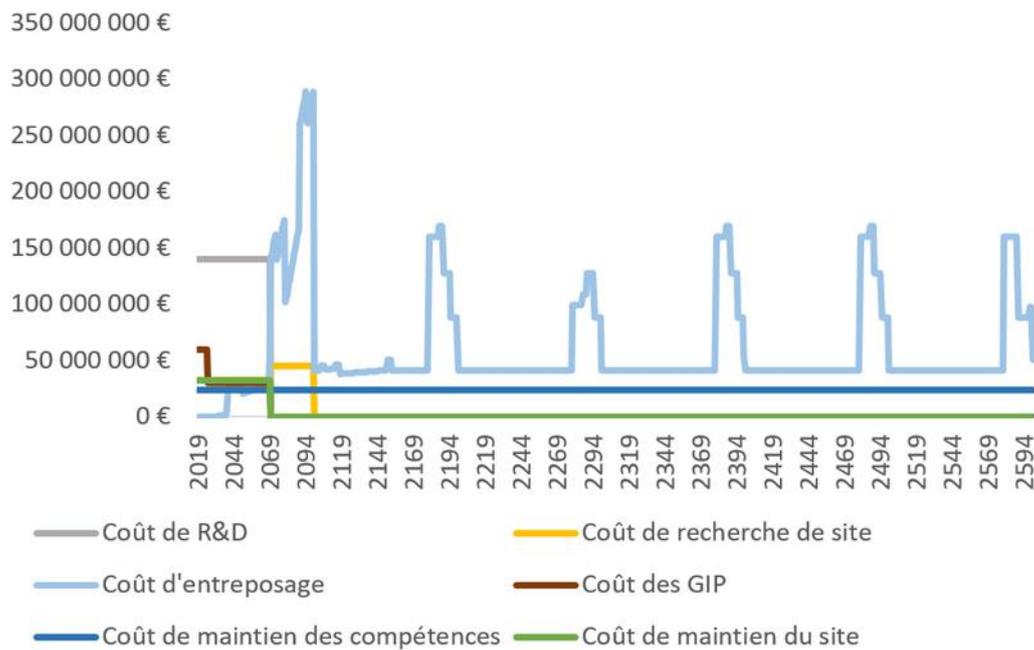


Figure 5.5-10 Chronique du coût de la branche 4.8 par type de coût, jusqu'en 2165



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0055-B

Figure 5.5-11 Chronique du coût de la branche 4.8 par type de coût, jusqu'en 2600

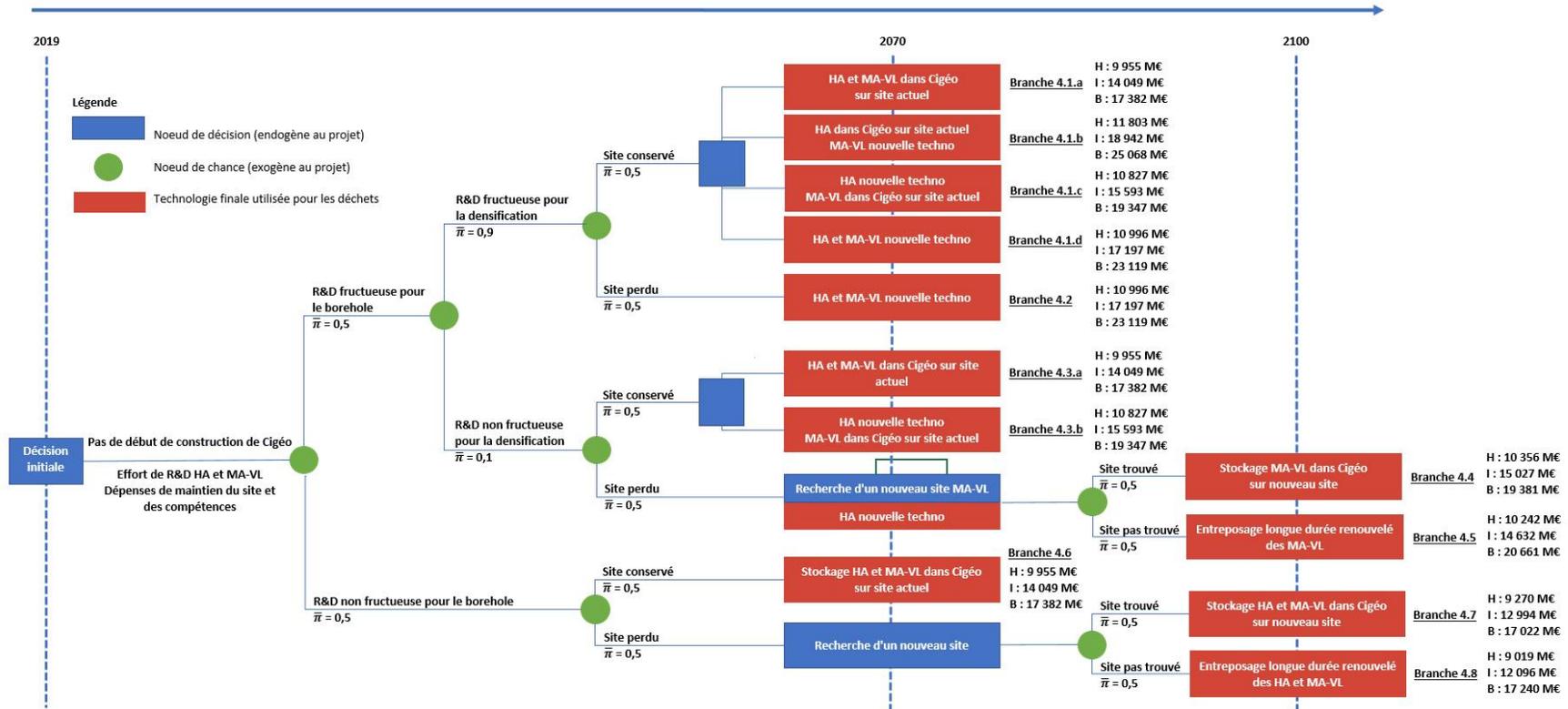
5.5.2 Coût actualisé de l'option 4 et espérance, après prise en compte du risque d'aléas sur les coûts, de l'évolution des prix

Ce chapitre présente directement les coûts après prise en compte des aléas sur les coûts (approche probabiliste avec 10 000 tirages), de l'évolution des prix relatifs (élasticité au PIB) et du temps long (actualisation). Les résultats sont présentés pour chaque scénario, avec la borne haute (H), la borne intermédiaire (I) et la borne basse (B) du taux d'actualisation.

5.5.2.1 Scénario OK

Les résultats d'une simulation de Monte-Carlo de 10 000 tirages sont présentés dans l'arbre de la Figure 5.5-12 ci-après.

Option de projet 4



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0056-B

Figure 5.5-12 Coût actualisé des branches de l'option 4, taux d'actualisation haut, intermédiaire et bas, scénario OK

Comme pour les précédentes options, les différences de coûts entre les branches sont mineures.

- Pour un taux d'actualisation élevé, la branche la moins onéreuse de cette option est celle d'un entreposage de longue durée renouvelé ; celle-ci s'élève à 9 019 millions d'euros. Cette branche pose toutefois une question de cohérence interne de l'arbre de décision : le décideur public a tout intérêt à espérer qu'aucune technologie ni aucun site ne soit trouvé, ou de refuser de les mettre en place si ces derniers sont trouvés en 2070 et/ou en 2100, malgré un investissement important en R&D et en recherche de site. Ce hiatus pousse à investiguer les conséquences d'une option dans laquelle il serait immédiatement décidé de s'en tenir à de l'entreposage de longue durée renouvelé, sans même lancer de l'investissement en recherche et développement en vue de trouver une solution prospective de mise en sécurité définitive des déchets (voir la variante de l'option 4 ci-dessous).
- Pour le taux d'actualisation intermédiaire, la branche la moins onéreuse de cette option est la même : un entreposage de longue durée renouvelé pour un coût s'élevant à 12 096 millions d'euros, ce qui pose à nouveau la question de cohérence interne décrite ci-dessus.
- Pour le taux d'actualisation bas, le résultat et le raisonnement sont légèrement différents : c'est la branche 4.7 qui présente le coût global actualisé le plus faible (17 022 millions d'euros). Cette branche n'est toutefois pas toujours accessible : avec une probabilité comprise entre 0,3 et 0,7, distribué uniformément, et en moyenne de 0,5, le site sera perdu. Dans ce cas, le choix le moins coûteux est de continuer l'entreposage de longue durée renouvelé, soit la branche 4.8. Ainsi, l'espérance est, en moyenne, simplement égale à la moyenne des deux branches, soit 17 133 millions d'euros.

Nous pouvons ajouter une condition à ces choix dans l'arbre de décision : supposer qu'une priorité est donnée à une solution de mise en sécurité définitive. Dès lors, une solution définitive est mise en œuvre si une solution existe en 2070 ou en 2100, même s'il est moins coûteux d'attendre. Ainsi, en actualisation haute, l'espérance est de 9 995 millions d'euros :

- avec une probabilité de 0,5 en moyenne, le site de Meuse/Haute-Marne est conservé ; le décideur public met alors en œuvre Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne, pour un coût moyen de 9 955 millions d'euros .
- avec une probabilité de 0,225, une technologie prospective (et un nouveau site) sont trouvés pour les déchets HA et MA-VL ; le décideur public met alors en œuvre la technologie pour les déchets HA et MA-VL, pour un coût moyen de 10 996 millions d'euros.
- avec une probabilité de 0,25 le site de Meuse/Haute-Marne est perdu, et aucune technologie n'est trouvée ; l'espérance de cette sous-branche est le produit pondéré de l'entreposage de longue durée et le stockage des HA et des MA-VL au sein de Cigéo sur un nouveau site, soit 9 145 millions d'euros.
- avec une probabilité de 0,025, le site de Meuse/Haute-Marne est perdu, et une technologie prospective n'est trouvée que pour les HA. L'espérance moyenne de cette sous-branche est de 10 299 millions d'euros ($10\,356 \cdot 0,5 + 10\,242 \cdot 0,5$).

En taux bas et intermédiaire, les cheminements sont identiques, et les espérances de 18 676 millions d'euros et 14 400 millions d'euros, respectivement.

► VARIANTE DE L'OPTION 4 SANS R&D : QUEL COÛT D'UNE VARIANTE CONSIDÉRANT L'ABANDON DÈS À PRÉSENT D'UNE MISE EN SÉCURITÉ DÉFINITIVE DES DÉCHETS RADIOACTIFS ?

Les estimations du coût actualisé de l'option 4 suggèrent que le décideur public pourrait être incité, pour des raisons purement économiques, à ne pas chercher à gérer durablement les déchets radioactifs, alors même que ce principe est inscrit dans la loi. Nous estimons le coût d'une variante de l'option 4, dans laquelle il n'y aurait que des coûts d'entreposage de longue durée renouvelé, mais aucune dépense de R&D et aucune dépense de recherche de site, ni pour Cigéo, ni pour aucune technologie prospective.

Sans tenir compte dans un premier temps, de la probabilité d'accident, le **coût brut** de cette variante de l'option 4 est de 49 840 millions d'euros, dont 35 452 millions d'euros d'entreposage, 13 968 millions d'euros de maintien des compétences et 420 millions d'euros de GIP.

En scénario OK, le coût de cette variante de l'option 4 (entreposage de longue durée renouvelé sans R&D) est de 2 303 millions d'euros avec la borne haute du taux d'actualisation, 4 026 millions d'euros avec la borne intermédiaire et 8 448 millions d'euros avec la borne basse.

En scénario KO, le coût de cette variante de l'option 4 (entreposage de longue durée renouvelé sans R&D) est de 3 577 millions d'euros avec la borne haute du taux d'actualisation, 8 306 millions d'euros avec la borne intermédiaire et 23 836 millions d'euros avec la borne basse du taux d'actualisation.

Le coût de l'accident dans cette variante fera l'objet d'un paragraphe complémentaire dans le chapitre 6.6.1.3 du présent document.

5.5.2.2 Scénario KO

Les résultats d'une simulation de Monte-Carlo de 10 000 tirages sont présentés dans l'arbre de la Figure 5.5-13 ci-après.

À la différence du scénario OK, et en ne tenant compte à ce stade que des coûts de l'option 4, l'entreposage de longue durée renouvelé est moins coûteux que les autres branches de l'option 4 avec le taux d'actualisation haut et le taux d'actualisation intermédiaire :

- Avec un taux d'actualisation élevé, le coût actualisé minimal au sein de cette option est obtenu en ne mettant en place aucune solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, même si une technologie prospective et un site sont trouvés. Les déchets HA et MA-VL sont gérés par de l'entreposage de longue durée renouvelé, pour un coût moyen de 11 739 millions d'euros ;
- Avec un taux d'actualisation intermédiaire, le coût actualisé minimal est également obtenu avec l'entreposage de longue durée renouvelé, pour un coût moyen de 18 638 millions d'euros.
- Avec un taux d'actualisation bas, le coût actualisé minimal est obtenu par la mise en œuvre du centre de stockage Cigéo pour les déchets HA et MA-VL si le site est conservé (33 067 millions d'euros) ; si le site est perdu, l'entreposage de longue durée renouvelé est la solution la moins coûteuse (35 842 millions d'euros). Le site de Meuse/Haute Marne n'est conservé qu'avec une probabilité comprise entre 0,3 et 0,7, et en moyenne de 0,5 ; l'espérance moyenne de l'arbre est ainsi de 34 455 millions d'euros.

En posant l'hypothèse d'une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive, même si celle-ci est plus coûteuse que l'entreposage de longue durée renouvelé, le raisonnement est identique à celui en scénario OK. L'espérance de la branche atteint 38 430 millions d'euros avec un taux d'actualisation bas, 23 522 millions d'euros avec un taux d'actualisation intermédiaire et 14 038 millions d'euros avec un taux d'actualisation haut.

Pour mémoire, la Figure 5.5-14 rappelle les probabilités associées à chaque branche de l'option 4.

Option de projet 4

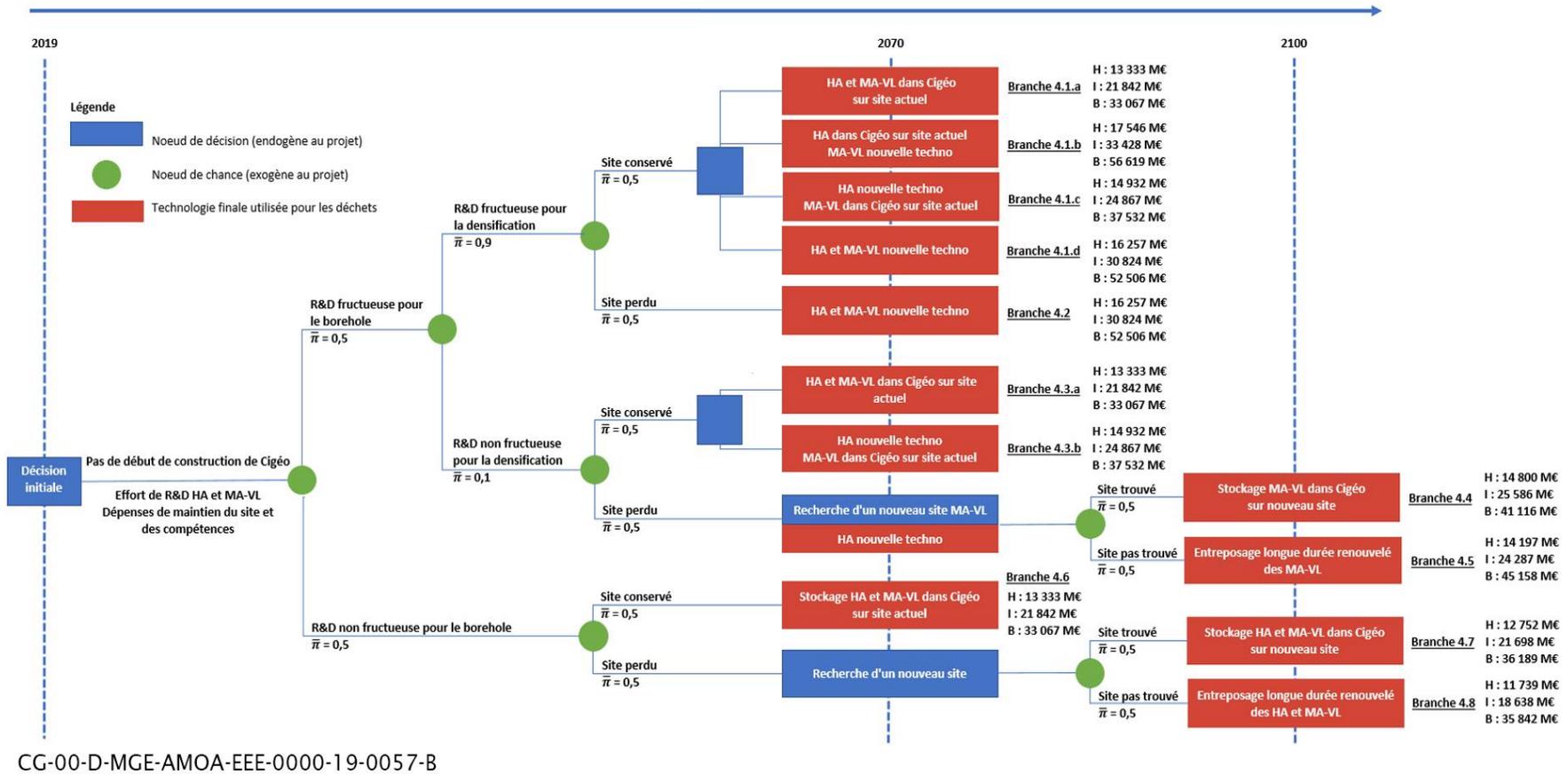
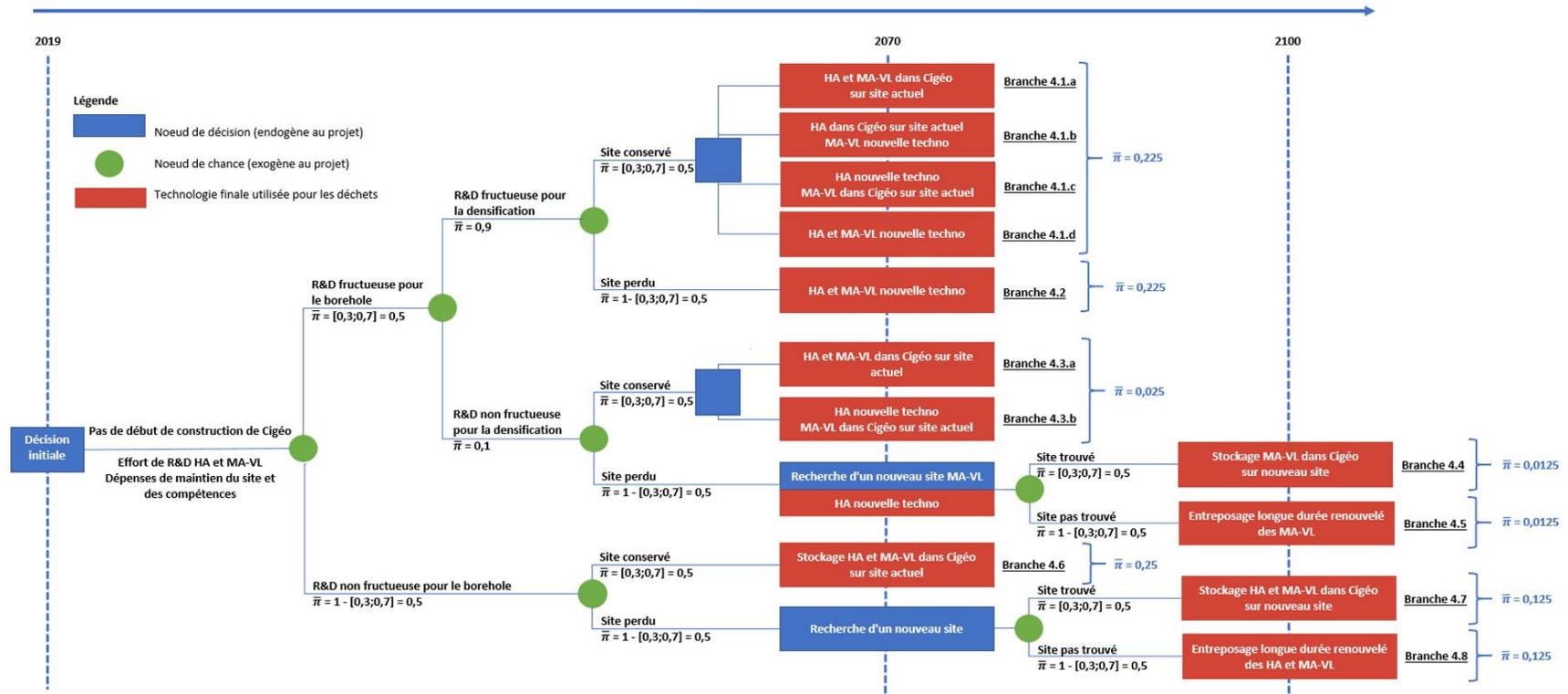


Figure 5.5-13

Coût actualisé des branches de l'option 4, taux d'actualisation haut, intermédiaire et bas, scénario KO

Option de projet 4



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0062-A

Figure 5.5-14 Probabilité des branches de l'option 4

5.5.3 Comparaison avec les coûts de l'option de projet 1

5.5.3.1 Scénario OK

Tableau 5.5-2 Comparaison des coûts de l'option de projet 1 et de l'option 4, en scénario OK

Scénario OK	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Option de projet 1	9 836 M€	12 544 M€	14 482 M€
Option 4	9 019 M€	12 096 M€	17 133 M€
Delta moyen (option 4 - option de projet 1)	-817 M€	-448 M€	2 651
Probabilité que l'option de projet 1 soit moins chère que l'option 4	35 %	44 %	86 %

Pour résumer, dans le scénario OK qui ne tient compte que des coûts, la décision dépend de la préférence du taux d'actualisation :

- avec un taux d'actualisation élevé ou intermédiaire, l'espérance de coût de l'option 4 est inférieure au coût de l'option de projet 1 ; la différence entre les options est toutefois ténue ; la probabilité que l'option de projet 1 l'emporte est tout de même de 35 % avec un taux d'actualisation élevé, et de 44 % avec un taux d'actualisation intermédiaire.
- avec un taux d'actualisation faible, l'option de projet 1 est préférable à l'espérance de l'option 4, pour une probabilité de 86 %.

5.5.3.2 Scénario KO

Tableau 5.5-3 Comparaison des coûts de l'option de projet 1 et de l'option 4, en scénario KO (uniquement sur les coûts)

Scénario KO	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Option de projet 1	11 646 M€	16 741 M€	22 835 M€
Option 4	11 739 M€	18 638 M€	34 455 M€
Delta moyen (option 4 - option de projet 1)	93 M€	1 897 M€	11 620 M€
Probabilité que l'option de projet 1 soit moins chère que l'option 4	51 %	60 %	99 %

En ne tenant compte que des coûts, dans le scénario KO, l'option de projet 1 (la réalisation du centre de stockage Cigéo comme prévu par l'Andra en réponse à la loi) est préférable à l'option 4, et ce quel que

soit le taux d'actualisation utilisé. Rappelons qu'en scénario KO, une probabilité d'accident est introduite. Les conséquences de l'accident sont étudiées dans le chapitre 6 et les résultats complets de l'analyse coût-bénéfice sont présentés dans le chapitre 7 du présent document.

5.6 Récapitulatif du coût des options

5.6.1 Scénario OK

5.6.1.1 Actualisation haute

Le tableau suivant reprend pour la borne haute de l'actualisation l'ensemble des espérances de coûts des quatre options, ainsi que, pour les options 2, 3 et 4, le delta moyen avec l'option de projet 1 (un signe positif indique que l'option de projet 1 est l'option au coût global actualisé le plus bas ; alternativement, un signe négatif indique que l'option 2, 3 ou 4 aboutit à un coût global actualisé inférieur au coût global actualisé de l'option de projet 1), et la probabilité que le coût global actualisé de l'option de projet 1 soit inférieur au coût global actualisé des autres options, sur les 10 000 tirages.

Tableau 5.6-1 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne haute du taux d'actualisation*

Scénario OK Actualisation haute	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		9 836 M€		
Option 2		12 771 M€	2 935 M€	100 %
Option 3		14 315 M€	4 479 M€	100 %
Option 4	9 019 M€	9 995 M€	-817 M€	35 %

5.6.1.2 Actualisation intermédiaire

Tableau 5.6-2 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, valeur intermédiaire du taux d'actualisation*

Scénario OK Actualisation intermédiaire	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		12 544 M€		
Option 2		16 013 M€	3 469 M€	100 %
Option 3		18 042 M€	5 498 M€	100 %
Option 4	12 096 M€	14 400 M€	- 488 M€	44 %

5.6.1.3 Actualisation basse

Tableau 5.6-3 Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne basse du taux d'actualisation

Scénario OK Actualisation basse	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		14 482 M€		
Option 2		18 225 M€	3 743 M€	100 %
Option 3		20 714 M€	6 232 M€	100 %
Option 4	17 133 M€	18 676 M€	2 651 M€	86 %

5.6.2 Scénario KO

Notons qu'à ce stade de l'évaluation socioéconomique, les résultats de l'option 4 dans ce chapitre ne sont encore que partiels, puisqu'ils ne comparent que le coût des options et n'intègrent pas la modélisation des bénéfices. Ce sera l'objet du chapitre 6 ci-après.

5.6.2.1 Actualisation haute

Tableau 5.6-4 Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne haute du taux d'actualisation

Scénario KO Actualisation haute	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		11 646 M€		-
Option 2		15 140 M€	3 493 M€	100 %
Option 3		17 194 M€	5 548 M€	100 %
Option 4	11 739 M€	13 748 M€	93 M€	51 %

5.6.2.2 Actualisation intermédiaire

Tableau 5.6-5 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne intermédiaire du taux d'actualisation*

Scénario KO Actualisation intermédiaire	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		16 741 M€		
Option 2		21 046 M€	4 305 M€	100 %
Option 3		24 271 M€	7 530 M€	100 %
Option 4	18 638 M€	23 522 M€	1 897 M€	60 %

5.6.2.3 Actualisation basse

Tableau 5.6-6 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne basse du taux d'actualisation*

Scénario KO Actualisation basse	Coût actualisé espéré de l'option	Coût actualisé espéré pour une priorité donnée à un choix de mise en sécurité définitive	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1		22 835 M€		
Option 2		27 726 M€	4 891 M€	100 %
Option 3		32 678 M€	9 843 M€	100 %
Option 4	34 455 M€	38 430 M€	11 620 M€	99 %

6

Quantification des bénéfices et risques évités par les différentes options

6.1	Propos préliminaires et présentation de la démarche de sûreté du centre de stockage Cigéo	184
6.2	Hypothèses de sûreté des autres options	188
6.3	Analyse différentielle qualitative des périodes de risque, selon les <i>scenarii</i>	189
6.4	Définition des périmètres d'intervention et de l'accident à considérer	191
6.5	Coûts unitaires de l'incendie sur un site d'entreposage imaginé	201
6.6	<i>Scenarii</i> , probabilités et conséquences d'un incendie en entreposage	209

Le baromètre 2020 de l'IRSN interroge la perception des risques et de la sécurité par les Français (79) et pose notamment la question « *parmi les activités industrielles ou technologiques suivantes, quelles sont celles qui selon vous risquent le plus de provoquer un accident grave ou une catastrophe en France ?* ». La première réponse est « les centrales nucléaires » (33 % de citations), la deuxième est « le stockage des déchets radioactifs » (20 %)⁶¹, suivi en troisième par les installations chimiques (18 %).

Le projet à l'étude concerne non pas une centrale nucléaire mais une installation qui vise à accueillir les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue, qu'ils aient été produits et qu'ils restent à produire par le parc nucléaire actuel français en activité (installations nucléaires de base (INB) existantes ou autorisées). L'évaluation se doit d'analyser d'une part les risques spécifiques relatifs au projet, et d'autre part la façon dont le projet permet de s'en prémunir.

La gestion des déchets radioactifs est une activité réglementée par l'Autorité de sûreté nucléaire. Les installations d'entreposage de colis de déchets HA et MA-VL sont des INB soumises à une réglementation contraignante qui vise à protéger l'homme et l'environnement contre les effets des rayonnements ionisants. Le transport des déchets radioactifs est soumis à une réglementation spécifique basée sur des standards élaborés par l'Agence internationale de l'énergie atomique (réglementation ADR⁶²). Le centre de stockage Cigéo, classé également comme INB et dont le Dossier d'option de sûreté (DOS) a fait l'objet d'un examen approfondi par l'IRSN et par l'ASN, sera soumis au référentiel d'exigences de toute INB et à des exigences supplémentaires liées à son caractère unique : une période de fonctionnement de plus d'un siècle et une démonstration de sûreté passive sur le très long terme, à savoir plusieurs centaines de milliers d'années.

Il est important de préciser ici que les risques inhérents à l'activité d'une installation nucléaire de base sont pris en compte dès sa conception afin qu'un dimensionnement adéquat permette à l'installation de résister aux situations accidentelles jugées crédibles.

Le débat public sur le PNGMDR a permis aux acteurs de la gestion des matières et des déchets radioactifs d'apporter des éléments de réponse aux différentes réserves exprimées, des éclairages à certaines des questions posées en montrant les barrières mobilisées pour limiter les risques et donc démontrer la robustesse des solutions techniques.

Le centre de stockage Cigéo diffère des autres INB de par sa dimension temporelle : l'installation vise à protéger l'homme et l'environnement des rayonnements ionisants émis par les déchets HA et MA-VL sur le très long terme et apporte une solution de mise en sécurité définitive pour la gestion de ces déchets. Sur le très long terme, il y a ainsi une transition depuis une approche active de la sûreté de l'installation (intervention et responsabilité humaine constante et directe) vers une approche passive : la géologie prend le relais de l'homme ce qui permet de ne plus faire reposer la sûreté sur l'existence d'une société stable et « vigilante ».

L'entreposage de longue durée, en maintenant les déchets radioactifs dans des entrepôts en surface, laisse une accessibilité plus directe aux déchets radioactifs. Cela a l'avantage de laisser ouverte la possibilité de voir émerger d'autres solutions issues de la recherche. En contrepartie, cela impose le maintien de l'intervention humaine pour assurer une surveillance, ainsi que pour reconstruire et entretenir périodiquement les installations temporaires d'entreposage, tant que les déchets resteront dangereux.

Pour tenir compte du risque accidentel, cette évaluation se place sous l'hypothèse d'une continuité institutionnelle dans le cadre du scénario OK. En complément, l'évaluation considère un scénario dans lequel une dégradation du niveau de développement finirait par entraîner, au bout de plusieurs décennies, un relâchement des exigences sociales et des normes réglementaires en matière de sûreté - c'est le scénario KO.

⁶¹ Le baromètre 2020 précise que « après un léger recul en 2017 et 2018, le stockage de déchets radioactifs reprend la deuxième place aux installations chimiques avec 20 % de citations (+ 5 points par rapport à 2018, pour revenir aux niveaux de 2011-2013). Cette hausse ne semble pas être à rapprocher d'événements particuliers qui auraient pu être médiatisés en 2019. »

⁶² ADR est l'acronyme en anglais de : Accord for Dangerous goods by Road ; en français : Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par la route (80).

Les accidents à envisager diffèrent selon les installations concernées et les phases techniques dans lesquelles ils surviennent (transport, fonctionnement, démantèlement, etc.). Dans la société en ordre de marche du scénario OK, l'ensemble des risques est pris en compte et la conception des ouvrages est dimensionnée pour les intégrer, selon les contraintes imposées par les autorités en charge de la sûreté nucléaire. On peut ainsi supposer que la probabilité d'un accident majeur est inférieure ou égale à 10^{-6} par an (c'est-à-dire inférieure ou égale au milliardième), qui correspond au standard de sûreté de l'Agence internationale de l'énergie atomique, et qu'en cas de survenue de l'événement, des dispositifs importants de gestion de crise et de limitations de dommages entreraient en jeu. Ainsi dans l'évaluation socioéconomique, les risques accidentels, estimés en termes d'espérance de dommages, paraissent négligeables dans l'ensemble des options sous le scénario OK en comparaison des autres grandeurs en jeu.

Cette évaluation socioéconomique interroge toutefois la stabilité sociétale du scénario OK sur le temps long, laissant émerger la possibilité de basculer dans une société chaotique modélisée par le scénario KO. Logiquement, les risques accidentels dans un tel scénario sont très supérieurs et doivent être appréciés au regard de la sûreté assurée par la conception des solutions de gestion des déchets radioactifs envisagées :

- Dans le cas du stockage géologique profond, la sûreté sur le temps long est assurée de manière passive par la couche géologique, obtenue une fois l'installation fermée. Après fermeture, les risques accidentels du centre de stockage Cigéo dans une société chaotique (ou ayant perdu toute mémoire institutionnelle) sont appréhendés à travers un scénario, décrit de manière qualitative, d'intrusion humaine. Leur analyse est faite dans le dossier d'options de sûreté du projet indiquant que les conséquences humaines et environnementales d'une telle intrusion resteraient malgré tout limitées.
- Dans le cas des solutions prospectives envisagées par cette évaluation socioéconomique (le stockage par forage profond avec ou sans densification préalable), il est imaginé par hypothèse que ces solutions disposent des mêmes exigences de sûreté passive que celles du stockage géologique profond. Par ailleurs, ces solutions de gestion prospective conduiraient, tout comme le stockage en couche géologique profonde, à une gestion passive des déchets radioactifs.
- Dans le cas de l'entreposage de longue durée renouvelé, la conception des installations intègre par définition une démarche de sûreté active, basée sur l'intervention humaine continue portée sur les déchets radioactifs d'une part et sur les installations d'entreposage d'autre part. C'est cette sûreté active qui serait remise en question dans une société chaotique.

Par conséquent, lorsque le risque est envisagé dans le cadre du scénario KO, il est envisagé sur le temps long et affecte les solutions prospectives sans mise en sécurité définitive telle que l'entreposage de longue durée renouvelé. Ce risque d'accident est affecté d'une probabilité comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} par an (c'est-à-dire entre le dix-millième et le millième), et l'on estime que ses conséquences, en termes notamment de gestion de crise, seraient mal maîtrisées.

Le chapitre 6.1 du présent document, résume en des termes simples la démarche de sûreté, rappelant les procédures mises en œuvre et les mécanismes physiques qui permettent de limiter ces risques. Ces informations sont issues, parfois de façon extensive, de sources accessibles publiquement et notamment des fiches pédagogiques de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Puis, le chapitre 6.2, expose les hypothèses de sûreté retenues pour les autres options.

Le chapitre 6.3 fait la synthèse différentielle de la sûreté entre les options et met en évidence de quelle manière les différentes options de projet étudiées dans cette évaluation socioéconomique exposent la société au risque accidentel ou au contraire permettent de s'en prémunir.

Ainsi, la logique de l'évaluation socioéconomique revient en lieu et place de la logique d'ingénierie de la sûreté. En effet, le propre de l'évaluation socioéconomique est bien de réaliser une analyse coûts-bénéfices, qui nécessite, par convention au titre de l'évaluation des bénéfices, d'estimer le coût des dommages évités, traduit ici par la monétarisation du coût d'un accident que certaines solutions de gestion des déchets radioactifs peuvent éviter. Dans cette perspective, le chapitre 6.4 de ce document, permet de décrire ce que seraient les conséquences radiologiques d'un accident, en définissant les

périmètres d'intervention : ceux observés dans le cas des accidents de centrale, ceux imaginés pour les besoins de cette évaluation, à savoir un incendie sur un entrepôt suite à l'abandon de l'installation.

Le chapitre 6.5 vise à définir les coûts unitaires d'un tel accident, selon ses différentes composantes, et estime le coût brut de cet accident en recourant à l'application sur les sites nucléaires existants de Marcoule et de La Hague.

Enfin, le chapitre 6.6 intègre le coût d'un accident aux options concernées dans le cadre du scénario KO, afin de réaliser des comparaisons globales avec l'option de projet 1.

6.1 Propos préliminaires et présentation de la démarche de sûreté du centre de stockage Cigéo

La classification usuelle des déchets radioactifs évoquée dans l'introduction de ce présent document, rappelle que les déchets radioactifs sont classés par filière de gestion, selon leur radiotoxicité, leur activité (exprimée en Becquerel⁶³) et leur durée de vie. Le niveau d'activité donne une indication sur l'intensité du rayonnement radioactif à un moment donné, donc sur la dangerosité potentielle du déchet.

Les déchets HA, dont l'activité est de plusieurs milliards de Bq/gramme, sont entreposés dans des installations spécifiques sur les sites de production à La Hague et à Marcoule sous forme de colis vitrifiés (les déchets sont incorporés dans une matrice de verre puis conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable). Leur entreposage est nécessaire pendant une cinquantaine d'années afin que leur température baisse suffisamment avant d'être stockés en couche géologique profonde. La durée de vie des déchets HA peut aller jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années. Ils représentent 0,2 % du volume total des déchets radioactifs présents sur le territoire français, et environ 95 % de la radioactivité totale.

Les déchets MA-VL, dont l'activité varie entre 1 million et 1 milliard de Bq/gramme, sont entreposés sur les sites des producteurs à La Hague, Marcoule, Cadarache, Valduc et prochainement au Bugey⁶⁴. Ils représentent 3 % du volume total des déchets radioactifs présents sur le territoire français et 5 % de la radioactivité totale.

Le débat public organisé de mai à décembre 2013 à propos du « Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne (Cigéo) » a permis de mettre en évidence les craintes de certaines parties prenantes (2014 (81)).

À ce titre, parmi la liste des risques, les plus fréquemment invoqués sont les suivants :

- le risque d'accident en phase d'entreposage ;
- le risque pendant la phase de transport des déchets radioactifs, en cas de déraillement d'un convoi ferroviaire ou d'accident d'un convoi routier par exemple ;
- le risque pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, en cas d'explosion souterraine ;
- le risque après la fermeture du site, en cas de contamination non maîtrisée du sous-sol ou en cas d'intrusion.

Bien que le risque zéro n'existe pas plus dans l'industrie nucléaire que dans d'autres activités humaines, l'industrie nucléaire met en œuvre de longue date une solide démarche de sûreté.

⁶³ Le Becquerel (Bq) est l'unité légale de mesure internationale de l'activité d'une source radioactive, c'est-à-dire le nombre de transformations ou désintégrations d'atomes qu'y s'y produisent en une seconde.

⁶⁴ Une partie des déchets MA-VL relevant d'EDF a vocation à être entreposée dans l'installation ICEDA sur le site du Bugey.

L'objectif de la démarche de sûreté est de réduire au maximum la probabilité de survenue d'un accident et d'en limiter les conséquences dans l'hypothèse où l'accident surviendrait malgré tout. Une fois les objectifs de sûreté définis, des défaillances possibles sont imaginées (séisme, perte d'alimentation électrique, attaque extérieure, etc.) et le comportement de l'installation est simulé. La démarche de sûreté permet de déterminer les mesures (diversité de barrières étanches par exemple) visant à s'assurer que les conséquences d'une défaillance seraient acceptables.

En gestion des risques, le risque est défini comme la combinaison de plusieurs facteurs : l'exposition à un danger, la probabilité d'occurrence d'un événement potentiellement dommageable, la gravité des dommages.

Nous présentons ci-après les risques théoriques associés à la gestion des déchets radioactifs et exposons les exigences de sûreté associées, visant à empêcher l'exposition aux dangers et à en limiter les éventuelles conséquences.

6.1.1 Les risques en phase d'entreposage

Conformément aux prescriptions de l'Agence internationale de l'énergie atomique, les colis de déchets sont entreposés de manière à pouvoir être inspectés, surveillés, récupérés et préservés dans des conditions appropriées en vue de leur gestion ultérieure. Des mesures sont prises pour empêcher la dégradation du confinement de ces colis.

Les évaluations de sûreté portent sur l'ensemble des installations de conditionnement et d'entreposage. Elles visent à examiner les dispositions prises pour assurer leur sûreté.

Les procédés de traitement et de conditionnement des déchets mis en œuvre en France sont principalement le bitumage, la vitrification, l'immobilisation dans le ciment, l'incinération, la thermolyse et le compactage. Les colis produits sont susceptibles d'évoluer, en fonction notamment des modifications apportées aux procédés de conditionnement ou de l'évolution des caractéristiques des déchets produits. Les colis constituent la première barrière de confinement des déchets radioactifs et leur connaissance est essentielle pour évaluer la sûreté des installations d'entreposage et de stockage, susceptibles de les recevoir.

La doctrine de sûreté française est déterministe : un ensemble de mesures de sûreté sont déterminées de façon à abaisser le risque en-deçà d'un seuil estimé acceptable, sans que le risque résiduel fasse l'objet d'une estimation. La probabilité de 10^{-6} par année de fonctionnement et par installation est un objectif fixé par l'Agence internationale de l'énergie atomique qui fournit à l'évaluation socioéconomique une estimation raisonnable de la borne inférieure de la probabilité d'accident majeur. Dans le cas d'un entreposage de déchets radioactifs, cette probabilité de 10^{-6} par an signifie que si l'on observait 10 entrepôts (identiques et identiquement exploités), pendant 100 000 ans, on assisterait à un accident. La borne supérieure de la probabilité d'accident majeur dans une société en ordre de marche, pourrait être de 10^{-5} , selon les évaluations probabilistes de sûreté de niveau II effectuées par l'IRSN pour les REP 900 MW dans les années 2000.

Toutefois, dans une hypothétique société chaotique comme elle est modélisée au travers du scénario KO (cf. chapitre 3 du présent document), on ne peut exclure que les normes de sûreté et de sécurité se dégradent, conduisant à ce que la solution d'entreposage des déchets soit insuffisamment protectrice pour l'homme et l'environnement.

Dans le contexte chaotique du scénario KO, les sites d'entreposage pourraient être insuffisamment surveillés, voire abandonnés, entraînant un défaut de maintenance qui conduirait à la dégradation des barrières de confinement. Dès lors, pour des raisons accidentelles ou de malveillance, un incendie d'entreposage ou d'une mise à nu des colis pourraient survenir, engendrant des coûts économiques, environnementaux et humains, dont certains sont estimés dans le chapitre 6.5 du présent document. La probabilité d'un accident grave dans un tel scénario a été estimée comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} par an.

6.1.2 Les risques associés au transport des déchets radioactifs

Les transports de déchets de haute activité sont encadrés par une réglementation spécifique, reposant sur des prescriptions élaborées par l'Agence internationale de l'énergie atomique, afin de protéger le public, les travailleurs et l'environnement des risques que ces transports peuvent présenter : le risque d'irradiation externe de personnes, le risque d'inhalation ou d'ingestion de particules radioactives, la contamination de l'environnement, le risque de criticité.

L'approche de sûreté repose sur 3 niveaux de protection :

Tout d'abord, la **robustesse des emballages** permet d'assurer un maintien des fonctions de sûreté, y compris en cas d'accident sévère ; il s'agit du premier niveau de protection. Afin de garantir cette robustesse, la réglementation prévoit que l'emballage doit résister à des épreuves simulant des incidents et accidents. La robustesse des emballages est particulièrement importante : l'emballage doit apporter par lui-même une protection suffisante pour limiter les conséquences d'un accident sur la population et l'environnement même en cas de délai d'intervention des services de secours.

Les déchets de haute et moyenne activité sont transportés dans des emballages de transport agréés par l'Autorité de sûreté nucléaire, après instruction technique de leurs dossiers de sûreté démontrant leur capacité à résister aux épreuves réglementaires décrites par l'Agence internationale de l'énergie atomique simulant des conditions accidentelles sévères (cumulatives) :

- une épreuve de **chute** sur une dalle indéformable (agréée) d'une hauteur de 9 mètres. Le but est de simuler la chute de grande hauteur en conditions réelles ;
- une épreuve de **poinçonnement** : l'emballage de transport est lâché depuis 1 mètre de hauteur sur un poinçon métallique. Le but est de simuler l'agression de l'emballage par des objets perforants (par exemple des débris arrachés au véhicule lors d'un accident) ;
- une épreuve d'**incendie de 800 °C pendant 30 min**. Cette épreuve simule le fait que le véhicule puisse prendre feu après un accident ;
- une épreuve d'**immersion** sous 15 mètres d'eau pendant 8 heures et sous 200 mètres d'eau pendant une heure. Ces épreuves permettent de tester la résistance à la pression, dans l'hypothèse où l'emballage de transport tomberait dans de l'eau (dans un fleuve en bord de route ou dans un port lors du déchargement d'un navire).

Le deuxième niveau de protection concerne la **fiabilité des opérations de transport**, qui permet de réduire l'occurrence des anomalies, des incidents et des accidents. Cette fiabilité est assurée par le respect des exigences réglementaires, telles que la formation des différents opérateurs, la mise en place d'un système d'assurance de la qualité pour toutes les opérations, le respect des conditions d'utilisation des emballages, l'arrimage efficace des emballages de transport, la signalisation des emballages et des véhicules, etc.

Enfin, le troisième niveau concerne la **gestion des situations d'urgence**, qui permet de limiter les conséquences des incidents et des accidents. Ceci passe par exemple par la préparation et la diffusion aux différents acteurs de consignes à appliquer en cas d'urgence, la mise en place de plans d'urgence, la réalisation d'exercices de crise.

L'ensemble des mesures de sûreté servent à s'assurer que les dispositions prévues pour maîtriser le risque d'un accident pendant la phase de transport sont en place, ce qui est confirmé par la centaine d'inspections réalisées par l'ASN chaque année.

6.1.3 Les risques pris en compte pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo

Plusieurs facteurs déclenchants qui seraient susceptibles de venir perturber le fonctionnement du centre de stockage Cigéo ont été étudiés⁶⁵ :

- **La manutention** : le principal risque consiste en la chute ou l'agression du colis pendant son transfert. L'analyse de ces risques consiste en l'identification des appareils destinés à transférer les objets, des manutentions susceptibles d'être effectuées et des équipements qui pourraient être dégradés en cas de chute de charge ; et en l'identification des dispositions prises par l'exploitant pour minimiser les conséquences d'une telle chute.
- **L'incendie et l'explosion** : le retour d'expérience des installations souterraines conventionnelles (tunnels routiers et ferroviaires, exploitations minières, etc.) montre que la maîtrise des risques liés à l'incendie est un enjeu majeur pour le stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. En particulier, un incendie en milieu souterrain de manière générale se distingue par ses effets d'amplification rapide et les difficultés à gérer les opérations d'extinction. L'approche de sûreté pour le stockage géologique profond consiste à démontrer que les dispositions prévues pour prévenir et limiter les conséquences d'un incendie sont proportionnées et suffisantes (limitation de la présence de matériaux inflammables, compartimentage, etc.) :
 - ✓ Sur ces points, l'IRSN relève que la maîtrise des risques liés à l'incendie nécessitera de porter une attention particulière à deux secteurs précis : la propagation d'un incendie de la zone de travaux vers la zone de stockage, pendant la période de co-activité (période de réalisation concomitante d'activités nucléaires et de construction d'ouvrages souterrains), et à l'intérieur des alvéoles MA-VL où l'intervention humaine n'est pas prévue en cas de départ d'un incendie.
 - ✓ Pour ce qui concerne les risques d'explosion à l'intérieur des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo, les principaux sujets portent sur la prise en compte des risques de dégagement d'hydrogène. Au-delà d'une certaine concentration d'hydrogène dans l'air, l'explosion est possible. Des dispositions de ventilation sont prévues au stade de la conception pour prévenir ce risque.
- **La co-activité**, qui peut exposer au risque d'exposition radiologique du personnel intervenant dans la zone de travaux, à proximité de la zone nucléaire ; et au risque de propagation d'un incendie de la zone de travaux vers la zone nucléaire. Pour minimiser ces risques, le principe d'une séparation physique entre les zones nucléaires et les zones conventionnelles de chantier a été retenue. L'IRSN estime que cette architecture des ouvrages souterrains est cohérente et favorable à la maîtrise des risques liés à la co-activité.
- **Les agressions externes**, comme le risque d'inondation ou de séisme. Les puits et descenderies traverseront deux couches géologiques riches en eau et perméables, avant d'atteindre les installations souterraines. Afin de prévenir le risque d'inondation externe, les revêtements des puits et des descenderies devront être étanches.
- **Les risques liés au séisme** pendant le fonctionnement et à plus long terme. L'Andra a utilisé plusieurs méthodes visant à estimer le séisme maximal retenu pour le dimensionnement des installations. L'IRSN a estimé que la méthode employée pour le déterminer était pertinente, mais le niveau retenu *in fine* reste à expertiser lors de l'instruction des demandes d'autorisation. L'IRSN relève par ailleurs que toute installation en profondeur resterait, quoi qu'il arrive, moins exposée aux dégâts engendrés par un séisme qu'une installation de surface.

⁶⁵ Les risques internes et externes du centre de stockage Cigéo, lors de la phase de fonctionnement, ont été développés dans le Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (33), remis par l'Andra à l'ASN en 2016.

6.1.4 La sûreté après la fermeture du centre de stockage Cigéo

Le stockage géologique de déchets radioactifs doit être conçu dans des conditions garantissant, dans le temps, la protection de l'homme et de l'environnement. La sûreté du stockage est fondée avant tout sur la stabilité de la roche durablement confinante et sur le principe d'interposition de barrières multiples entre le déchet et la biosphère : les colis de déchets, les ouvrages du stockage et le milieu géologique. L'évaluation de sûreté consiste à apprécier la capacité de ces barrières à assurer que les défaillances potentielles de certains composants du stockage ne porteraient dans aucune situation conséquences à l'homme et l'environnement.

La roche hôte constitue une barrière géologique naturelle dont la fonction est d'isoler le stockage des perturbations de surface (intrusions humaines, glaciations, érosion) et de confiner la radioactivité au plus près des ouvrages qui contiennent les déchets. Elle doit assurer la sûreté « passive » du stockage après sa fermeture, c'est-à-dire sans intervention de l'homme. Pour ce qui concerne le projet global Cigéo, la formation argileuse du Callovo-Oxfordien est étudiée depuis 15 ans dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et a confirmé au moyen de campagnes de reconnaissance géologique, que cette couche possède les propriétés favorables à l'implantation d'un futur stockage.

Il ressort de ce bref résumé qualitatif que les risques d'accidents relatifs au centre de stockage Cigéo sont maîtrisés. Il est considéré que cette maîtrise des risques est valable à la fois pour le scénario OK et pour le scénario KO. En effet, même en cas de dégradation persistante des conditions macroéconomiques pouvant conduire, à long terme, à une baisse des exigences de sûreté, la géologie, assurant le confinement des radionucléides, permettra de protéger l'homme et l'environnement.

6.2 Hypothèses de sûreté des autres options

Rappelons que l'évaluation socioéconomique n'est en aucun cas une analyse technique des différentes solutions prospectives de gestion des déchets radioactifs. Dans le chapitre précédent, nous avons résumé les conclusions des études de sûreté existantes et à disposition à propos du centre de stockage Cigéo.

En l'absence de telles études de sûreté pour des technologies différentes du stockage en couche géologique profonde, l'évaluation socioéconomique fait simplement l'hypothèse qu'en cas de mise en place de la technologie prospective de forage profond, les années de R&D qui la précèderaient (*a minima* jusqu'en 2070, dans les options 2, 3 et 4) permettraient d'aboutir à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs au moins aussi sûre que le centre de stockage Cigéo. Nous considérerons donc dans la suite de l'analyse qu'il n'y a donc pas de différentiel de probabilité d'accident entre le centre de stockage Cigéo et les technologies prospectives considérées (forage profond pour les HA et processus de densification et mise en forage profond pour les déchets MA-VL) : l'hypothèse est posée que si une technologie prospective de mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL est mise en place, cette technologie aurait atteint un niveau de sûreté *a minima* égal à celui du centre de stockage Cigéo. Ainsi le différentiel de risque entre les technologies prospectives et le stockage géologique profond serait nul.

Le seul différentiel de risque concernerait donc les branches 4.5 et 4.8 de l'option 4 débouchant sur de l'entreposage de longue durée renouvelé et les branches 4.4 et 4.7 qui nécessitent un entreposage plus long que les autres branches. Dans un scénario KO, on ne peut en effet exclure que la fragilisation des institutions et de la gouvernance mène à un abandon sans surveillance des sites d'entreposage. Dans une telle configuration, ces derniers seraient donc soumis à un risque d'incendie.

La démarche d'évaluation socioéconomique nécessite d'affecter des probabilités aux risques d'accident même s'ils sont très faibles et de quantifier les conséquences radiologiques d'un tel accident. C'est l'objet des chapitres qui suivent.

6.3 Analyse différentielle qualitative des périodes de risque, selon les *scenarii*

Dans le scénario OK, le différentiel de risques entre toutes les options, quelles que soient les branches, sera considéré comme négligeable. En effet, le scénario OK correspond à la situation où les tendances des dernières décennies sont prolongées à très long terme, de sorte que les modalités de gestion des déchets radioactifs font l'objet d'une surveillance active, dans le cadre des politiques de prévention du risque et de gestion de crise. Cette surveillance ne limite pas seulement la probabilité annuelle de survenue d'un accident grave à 10^{-5} . Elle assure aussi que les conséquences d'un accident seraient contenues par des mesures rapides et efficaces de gestion de crise. À titre d'exemple, les facteurs conduisant à l'accident-type évalué ci-dessous (incendie en entreposage) ne sont envisageables qu'au sein d'une société très dégradée, puisqu'un incendie en entreposage ne peut résulter que d'une situation d'abandon, qui n'existe pas en scénario OK. Les coûts d'un accident grave dans la gestion des déchets resteraient ainsi inférieurs au moins d'un ordre de grandeur à ce qu'ils seraient dans une société dépourvue d'une surveillance active. L'espérance de coûts liés à un accident, que l'on obtient en pondérant les dommages par la probabilité, est ainsi inférieure de trois ordres de grandeur (deux pour la probabilité, une pour les conséquences) dans une société OK par rapport à une société KO, de sorte qu'elle devient négligeable au regard des autres montants en jeu dans l'évaluation socioéconomique.

En revanche, ce différentiel de risque est réel et pris en compte dans le scénario KO. L'hypothèse d'une société en ordre de marche (scénario OK) sur un horizon de temps long est en effet interrogée par cette étude.

Le tableau ci-après résume les périodes au cours desquelles de tels accidents pourraient se produire, en fonction de l'option et de la branche.

Tableau 6.3-1 Probabilité d'incendie en entreposage, dans les différentes options en scénario KO

Option	Solution retenue (selon la branche)	Probabilité π d'incendie en entreposage selon la période			
		2019-2155	2155-2203	2203-2208	Au-delà de 2208
Option de projet 1	<ul style="list-style-type: none"> Stockage géologique profond 	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et stockage géologique fermé)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et stockage géologique fermé)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et stockage géologique fermé)
Option 2	<ul style="list-style-type: none"> Stockage géologique profond (2.1.a et 2.2) Stockage géologique profond (MA-VL) et forage profond (HA) (2.1.b) 	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)
Option 3	<ul style="list-style-type: none"> Stockage géologique profond (3.1.b, 3.2.b et 3.3) Stockage géologique 	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)

Option	Solution retenue (selon la branche)	Probabilité π d'incendie en entreposage selon la période			
		2019-2155	2155-2203	2203-2208	Au-delà de 2208
	profond et forage profond (3.1.c et 3.2.a) • Forage profond (3.1.a)				
Option 4	• Stockage géologique profond (4.1.a, 4.3.a et 4.6) • Stockage géologique profond et forage profond.(4.1.b, 4.1.c, 4.3.b) • Forage profond (4.1.d, 4.2)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)
	• Stockage géologique profond sur nouveau site (MA-VL) et forage profond (HA) (4.4)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et solution géologique fermée)
	• Entreposage de longue durée renouvelé (MA-VL) et forage profond (HA) (4.5)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour MA-VL)	$\pi > 0$ (pour MA-VL)	$\pi > 0$ (pour MA-VL)
	• Stockage géologique profond sur nouveau site (4.7)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	π proche de 0 (entrepôts démantelés et stockage géologique fermé)
	• Entreposage de longue durée renouvelé (4.8)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)	$\pi > 0$ (pour HA et MA-VL)

Légende : vert = probabilité proche de zéro ; orange = probabilité positive

On observe dans ce tableau récapitulatif, que le différentiel de risque est nul entre les options 1, 2, et 3 et les premières branches de l'option 4.

En revanche, ce différentiel de risque existe entre l'option de projet 1 et les branches de l'option 4, pour lesquelles l'entreposage des déchets HA ou MA-VL est plus long ; le délai étant induit soit en raison du temps de recherche d'un nouveau site pour du stockage en couche géologique profonde, soit par une recherche de nouveau site infructueuse couplée à une R&D non fructueuse concernant la technologie prospective.

Les différentiels de périodes sujettes à un accident étant définies, il convient désormais de définir le périmètre d'un tel accident et d'en estimer le coût. C'est l'objet des chapitres qui suivent.

Préalablement, nous soulignons tout de même que seuls les coûts évités d'un incendie en entreposage sont mis au bénéfice des options et des branches conduisant à une mise en sécurité définitive. Un autre bénéfice des solutions de mise en sécurité définitive n'a pas été envisagé à ce stade : il s'agit du bénéfice moral de ne pas exposer les générations futures aux risques d'un accident potentiellement catastrophique en cas d'alternance avec un scénario KO. Ce bénéfice moral ou bénéfice assurantiel des solutions de mise en sécurité définitive, qui, en miroir, constitue un coût caché de l'entreposage de longue durée, est discuté dans le chapitre 7.2 du présent document.

6.4 Définition des périmètres d'intervention et de l'accident à considérer

L'objet de ce chapitre est d'identifier les données d'entrées nécessaires à la monétarisation des bénéfices. S'agissant d'un bénéfice évalué en termes de risques évités, il s'agit dans un premier temps de définir les périmètres à considérer en cas de situation accidentelle et dans un second temps de définir l'accident considéré pour les besoins de cette évaluation socioéconomique. Pour cela, un bref rappel des accidents nucléaires permet d'illustrer les périmètres d'intervention observés, avant de croiser avec les périmètres d'accident modélisé pour cette évaluation socioéconomique, pour enfin appliquer ces périmètres aux cas des sites d'entreposage actuels.

L'estimation des conséquences radiologiques d'un accident provient d'extrapolations de l'accident de Fukushima (82) (83) et d'études de l'IRSN (13) (84) (85).

6.4.1 Périmètres extrapolables issus d'un bref rappel des accidents nucléaires

Depuis le début du nucléaire en France, il n'y a eu aucun accident grave en entreposage ayant eu des impacts environnementaux, économiques ou sanitaires hors-site. C'est ce qui explique l'absence de données d'entrées susceptibles d'alimenter l'évaluation socioéconomique en cours.

Les accidents les plus graves intervenus sur le territoire français sont ceux de 1969 et 1980, ayant eu lieu à la centrale nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher). Ces deux accidents sont classés niveau 4 (sur 7) sur l'échelle internationale des événements nucléaires (INES). Ces accidents, résultats d'une fusion partielle des combustibles au sein d'un des réacteurs, ont eu un impact très limité hors de la centrale.

À l'échelle internationale, les deux accidents les plus graves ayant affecté une installation nucléaire sont les accidents de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011), classés au niveau 7 de l'échelle INES. L'accident de Three Miles Island (1979) a atteint le niveau 5. Ces trois accidents présentent toutefois d'importantes limites quant à l'extrapolation de leurs conséquences à l'objet de cette étude.

En premier lieu, il convient de noter qu'un accident en centrale comporte, du fait de la nécessité constante de refroidissement du cœur du réacteur et de contrôle de la réaction en chaîne, des caractéristiques de cinétique et de gravité intrinsèquement différentes de celles d'un accident impliquant des colis de déchets radioactifs.

S'agissant, par ailleurs, des conséquences sanitaires, économiques et environnementales de l'accident, celles de la centrale de Tchernobyl font encore l'objet de débats, alors que les effets à long terme, notamment sanitaires, de l'accident de Fukushima ne sont pas encore connus.

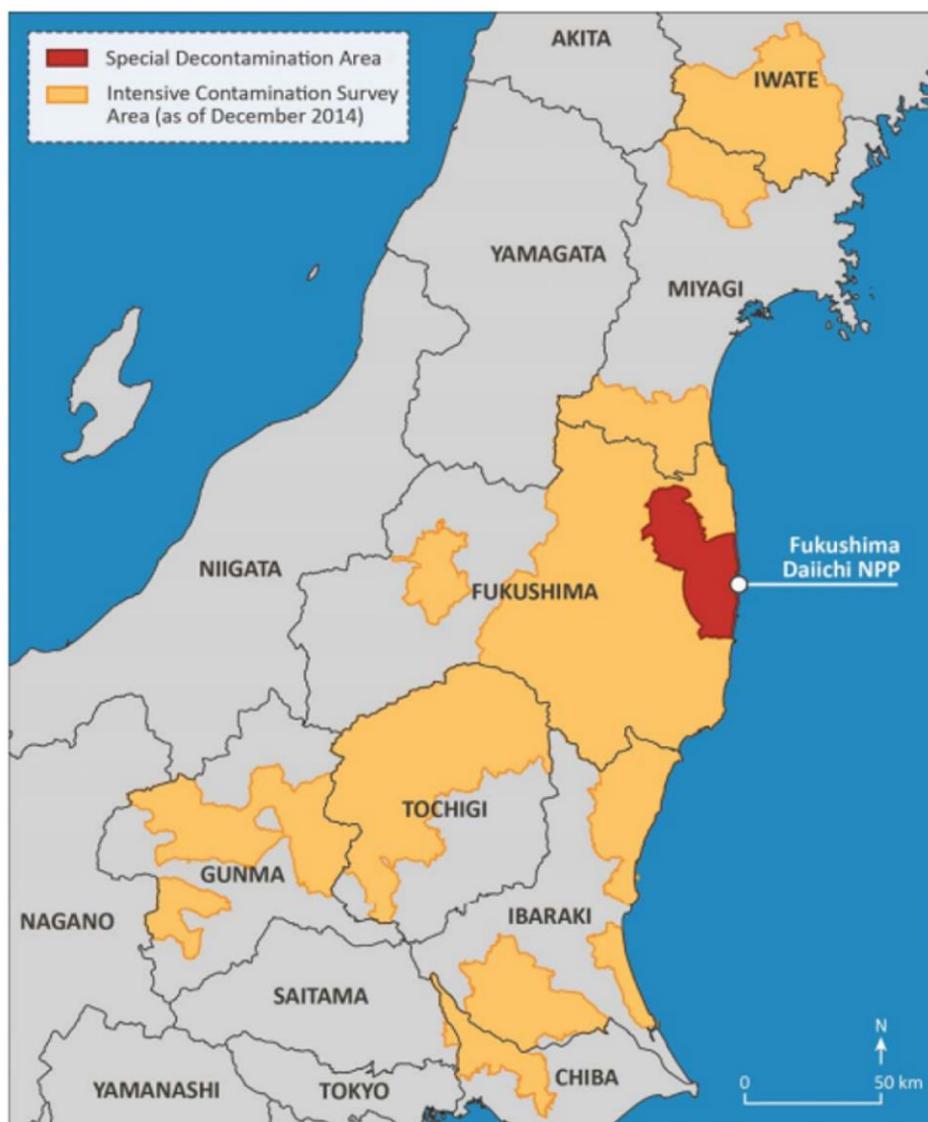
L'accident de Fukushima permet en revanche d'illustrer les dispositifs permettant la protection des populations et la limitation des conséquences environnementales

En effet, la réponse des autorités japonaises face au danger encouru par les populations avoisinantes a été immédiate : évacuation des zones les plus proches avant la première explosion, puis élargissement de la zone d'éloignement et mise à l'abri dès la signalisation des premiers rejets. Un plan de décontamination et de gestion post-accident a été établi par le gouvernement japonais et mis en œuvre dans la préfecture de Fukushima.

Toutefois, et tel que souligné en introduction, le scénario KO sous-tend des institutions et une gouvernance faible, avec une capacité limitée de gestion des conséquences d'un accident. L'extrapolation des conséquences de l'accident de Fukushima vers le cas d'un hypothétique accident en scénario KO présente ainsi un biais. À défaut de données issues d'accidents nucléaires au sein de sociétés comparables au scénario KO, nous mobilisons toutefois les données issues de l'accident de Fukushima, tout en notant le biais induit par cette démarche.

Les modalités de gestion post-accidentelle à Fukushima distinguent notamment deux zones (cf. Figure 6.4-1) :

- une zone d'évacuation des populations dite « special decontamination area » (SDA) correspondant à des doses supérieures à 20 mSv par an ;
- une zone nécessitant des actions de décontamination dite « intensive contamination survey area » (ICSA) correspondant à des doses entre 1 et 20 mSv par an.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0059-A

Figure 6.4-1 Zonage d'évacuation et de décontamination, suite à l'accident nucléaire de Fukushima

L'évaluation des dommages de l'accident de Fukushima ne peut être reprise telle quelle dans cette évaluation socioéconomique sans une sélection des éléments pertinents ni un traitement des données avant leur utilisation. Les données issues des études post-Fukushima sont principalement extraites du rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique sur les mesures de remédiation mises en place, publié en 2015 (82). Les « familles de conséquences » de ce rapport sur lesquelles nous nous appuyons pour cette étude sont les suivantes :

- **Les coûts des mesures d'évacuation et de relocalisation des populations** : l'évacuation des populations dans le cas d'un accident nucléaire nécessite du personnel médical et militaire. Par ailleurs, les évacués ne pouvant retourner chez eux une fois la situation stabilisée, peuvent bénéficier d'une aide des autorités en termes de logement, nourriture et autres produits de première nécessité ;
- **Les coûts de la décontamination** : les sols, bâtiments, champs et jardins doivent faire l'objet d'une décontamination afin de réduire les doses et éventuellement permettre aux personnes évacuées de revenir sur leurs lieux de vie précédents.

À partir de ces éléments tirés de la gestion post-accidentelle à Fukushima, de son coût, ainsi que ceux tirés de l'évaluation des conséquences d'un accident majeur en centrale, publiés par l'IRSN (86), nous avons estimés certains coûts unitaires qui seront détaillés dans le chapitre 6.5 du présent document.

Notons que les séquences accidentelles dans un entreposage seraient très différentes de celles – largement modélisées – des centrales nucléaires, les déchets radioactifs étant plus inertes que le combustible au cœur d'un réacteur. Avec l'aide de l'IRSN, des *scenarii* conventionnels d'accident en entreposage ont été mis au point et caractérisés en termes de rayonnement émis, de zones de protection, etc. Le chapitre qui suit a vocation à détailler les hypothèses correspondantes pour chiffrer les conséquences d'un accident fictif de type incendie suite à l'abandon d'un entreposage de déchets de type moyenne activité à vie longue.

6.4.2 Caractérisation de l'accident imaginé dans l'évaluation socioéconomique : incendie suite à l'abandon d'une installation d'entreposage

Pour les besoins de cette évaluation socioéconomique, traitant de la gestion des déchets radioactifs, il a été nécessaire d'extrapoler les conséquences radiologiques issues d'une situation accidentelle fictive.

Pour ce faire, une étude d'accident a été réalisée de manière générique, en concertation avec l'IRSN, en considérant une installation d'entreposage de conception analogue à celles qui existent actuellement.

Pour les besoins de l'estimation des dommages, les périmètres calculés ont quant à eux été projetés sur deux sites réels, à savoir les sites de Marcoule et de La Hague où sont entreposés aujourd'hui d'importantes quantités de déchets radioactifs.

L'hypothèse considérée ici projette l'accident fictif dans la limite conventionnelle d'un volume donné d'environ 5 000 colis de déchets entreposés de type MA-VL.

Le contexte sociétal dans lequel ce type d'accident fictif d'entreposage est imaginé a également été interrogé. Dans une société « en ordre de marche » (correspondant au scénario OK), la présence des institutions actives et les règles de sûreté établies par l'autorité compétente réduisent significativement à la fois les probabilités d'occurrence et les conséquences radiologiques d'un tel accident.

A contrario, une société chaotique (correspondant au scénario KO) aura des dispositifs de gestion de crise défaillants. Dans ce contexte, le scénario d'un abandon des installations d'entreposage de surface est vraisemblable, avec une probabilité d'occurrence accrue des rejets radioactifs dans l'atmosphère ainsi que des radiations émises en proximité.

Pour cette raison, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, des probabilités différentes sont affectées selon les *scenarii*.

Deux cas fictifs, schématisés par l'IRSN, peuvent être imaginés comme résultant de l'abandon d'un entreposage et entraînant des conséquences radiologiques :

1. Un incendie impliquant des colis de déchets MA-VL entreposés, provoquant lors de leur combustion des rejets radioactifs se propageant dans l'atmosphère et contaminant l'environnement au travers du panache de l'incendie ;
2. La mise à nu de colis de verre : un évènement entraîne la perte de toute ou partie des barrières physiques de protection radiologique des colis entreposés ; la protection radiologique n'est plus confinée que par les quelques millimètres d'acier dans lesquels les déchets sont placés ou coulés. Contrairement au scénario précédent, il n'y a pas de contamination de l'environnement par des rejets, le danger provient de la situation de perte de confinement, émettant des radiations en proximité. Bien que ce cas ait permis de montrer qualitativement qu'il pourrait avoir des conséquences sérieuses qu'un stockage géologique est à même d'éviter, il ne permet pas de fournir les données quantitatives nécessaires à l'évaluation de son coût socioéconomique. Il n'a donc pas été retenu dans la suite de l'étude.

Seules les conséquences d'un incendie sont étudiées et modélisées dans le cadre de cette évaluation socioéconomique.

6.4.3 Définition des périmètres d'intervention suite à un accident

Par hypothèse, les conséquences d'un incendie sur un entreposage sont évaluées en considérant un inventaire de 5 000 colis de déchets (MA-VL).

Dans l'hypothèse de survenue d'un accident ayant des conséquences radiologiques, il est tout d'abord nécessaire de considérer les différents périmètres définis selon les doses de radiation réelles auxquelles peuvent être exposées les populations environnantes, afin de déterminer les actions à mettre en place. Selon l'IRSN, les périmètres se distinguent selon la temporalité des actions entre celles associées à la gestion de l'accident et celles post-accidentelles, intervenant dans la durée (cf. Tableau 6.4-1 ci-après) :

- Les périmètres liés aux actions d'urgences, lors de l'accident :
 - ✓ le **périmètre d'évacuation**, conditionne l'évacuation des personnes lors de l'accident sur une zone dans laquelle les populations sont susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 50 mSv sur la durée du rejet considérée ;
 - ✓ le **périmètre de mise à l'abri des populations**, conditionne le confinement des personnes à l'intérieur des maisons, sur une zone dans laquelle les doses reçues sont supérieures à 10 mSv sur la durée du rejet considérée ;
- Les périmètres liés aux actions post-accidentelles, qui s'inscrivent dans la durée :
 - ✓ Le **périmètre d'éloignement**, qui correspond à la zone qui nécessite que les personnes qui y vivent soient éloignées durant le temps nécessaire à la réduction des niveaux d'activité dans la zone, par décroissance naturelle ou par la réalisation de travaux de décontamination. Dans le cas de l'accident de Fukushima, ce périmètre s'apparente à la zone dite « spécial décontamination area » (SDA).
 - ✓ La **zone de protection des populations**, cette zone, qui englobe le périmètre d'éloignement, correspond à la zone dans laquelle l'exposition des résidents nécessite d'être réduite par des mesures de radioprotection appropriées (par exemple la décontamination de terrains, des restrictions de consommation de produits locaux, des restrictions sur la circulation dans certaines aires plus contaminées, etc.). Dans le cas de l'accident de Fukushima, ce périmètre s'apparente à la zone dite « intensive contamination survey area » (ICSA).
 - À noter que la délimitation du périmètre d'éloignement et de la zone de protection des populations sont établis en fonction des doses possiblement cumulées sur un mois ou un an. Des valeurs repères de 10 mSv et 20 mSv par an ont été considérées pour les fixer.
 - ✓ Le **périmètre de surveillance des territoires** est défini selon une contamination significative mais où les mesures de radioprotection ne sont pas considérées comme nécessaires. Par exemple, dans ce périmètre, la commercialisation des produits peut être interdite.

Tableau 6.4-1 Rayon (en km) des périmètres des actions d'urgence et actions post-accidentelles, source IRSN⁶⁶

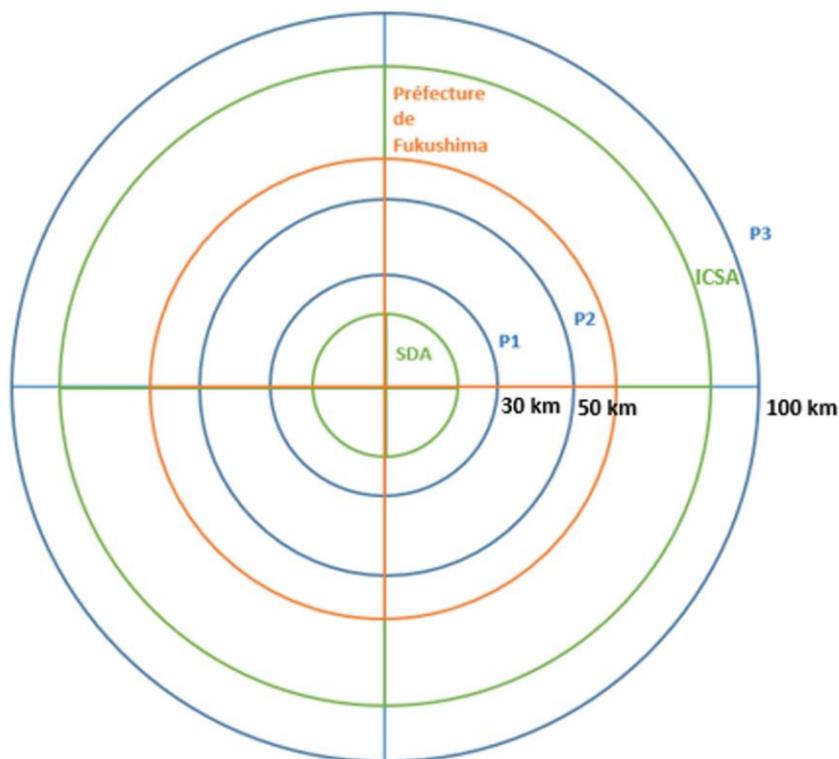
Type de gestion	Périmètre	Rayon (en km)		
		Hypothèse PE et ZPP : 10 mSv sur 1 mois	Hypothèse PE et ZPP : 20 mSv sur 1 an	Hypothèse PE et ZPP : 10 mSv sur 1 an
Action d'urgence	Périmètre d'évacuation	30		
	Périmètre de mise à l'abri	50		
Action post-accidentelle	Périmètre d'éloignement (PE)	6	15	20
	Zone de protection des populations (ZPP)	25	30	40
	Zone de surveillance des territoires (ZST)	> 100		

Pour les besoins de cette évaluation socioéconomique, deux hypothèses majorantes relatives aux périmètres considérés ont été faites pour la monétarisation des dommages dans le cas d'un incendie. Elles ont pour but de simplifier l'analyse à ce stade :

- Dans une analyse radiologique, la modélisation du panache radioactif généré lors d'un incendie se propage selon les vents dominants et les conditions météorologiques de la région étudiée. Or, dans cette évaluation, l'hypothèse simplificatrice est posée de considérer le périmètre du panache comme circulaire à 360°, sans considération de la rose des vents du site considéré ;
- Le nombre des périmètres étudiés a été réduit à trois :
 - ✓ P1, périmètre de moins de 30 km de rayon. Il s'apparente au périmètre d'évacuation concernant toute action d'urgence lors de l'accident et pour toute action post-accidentelle, il s'apparente à la zone de protection des populations et englobe le périmètre d'éloignement de l'IRSN. Au sein cette évaluation socioéconomique, ce périmètre est associé à la zone SDA en ce qui concerne les coûts de décontamination, et la préfecture de Fukushima en ce qui concerne les coûts de production de déchets radioactifs issus de la remédiation (cf. Figure 6.4-2). Il est également utilisé afin de calculer les coûts des réfugiés ainsi que les coûts économiques directs.
 - ✓ P2, périmètre de 30 à 50 km de rayon. Il s'apparente au périmètre de mise à l'abri (action d'urgence lors de l'accident) et à la zone de protection des populations de l'IRSN. Au sein cette évaluation socioéconomique, ce périmètre est associé à la zone ICESA en ce qui concerne les coûts de décontamination, et la préfecture de Fukushima en ce qui concerne les coûts de production de déchets radioactifs issus de la remédiation (cf. Figure 6.4-2).
 - ✓ P3, périmètre de moins de 100 km de rayon. Au sein cette évaluation socioéconomique, ce périmètre est associé à la zone ICESA en ce qui concerne les coûts de décontamination, et la zone hors préfecture de Fukushima en ce qui concerne les coûts de production de déchets radioactifs issus de la remédiation (cf. Figure 6.4-2).

⁶⁶ Ces périmètres sont calculés sur la base d'une météorologie type, avec une situation de vent faible classiquement retenue comme hypothèse moyenne pour la dispersion atmosphérique des rejets.

Le graphique ci-dessous représente les différentes zones et périmètres présentés jusqu'ici et qui seront utilisés au chapitre 6.4.4 du présent document :



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0061-A

Figure 6.4-2 Représentation des aires des zones P1, P2 et P3, de celles de l'IRSN, de celles la préfecture de Fukushima et des zones SDA et ICSA spécifiées d'après l'accident de Fukushima⁶⁷

⁶⁷ Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été posées afin de représenter graphiquement, simplement et de manière comparable les différentes aires dans ce graphique. Notamment, la zone ICSA et la préfecture de Fukushima sont représentés ici en cercles parfaits, sur la base d'aire connue qui n'est pas dans la réalité de forme géométrique circulaire.

6.4.4 Application de ces périmètres aux sites d'entreposage actuels

Les sites sur lesquels les conséquences d'un accident ont été étudiées sont les sites de La Hague et de Marcoule, qui concentrent à eux deux plus de 90 % de la radioactivité répertoriée sur le territoire français.



Figure 6.4-3 Localisation des principaux sites d'entreposage des déchets de haute et de moyenne activité à vie longue en France

6.4.4.1 Périmètres concernés sur le site de Marcoule

Berceau historique de l'industrie nucléaire française créé en 1955, Marcoule est le premier site industriel et scientifique du Gard. Le centre CEA de Marcoule emploie 1 500 collaborateurs. Outre les activités de recherche du site (qui portent sur les techniques de préparation de l'uranium, le traitement des combustibles nucléaires usés, les techniques d'assainissement et de démantèlement des installations nucléaires en fin de vie et sur la gestion des déchets les plus radioactifs), le site de Marcoule abrite également un entreposage de près de 5 500 m³ de déchets radioactifs, comprenant quelques déchets HA, des déchets MA-VL, FA-VL et FMA-VC (cf. Tableau 5.1-10).

- Surfaces potentiellement touchées par un incendie d'entrepôt à Marcoule, avec panache de rejets radioactifs

Dans le cas de l'accident radiologique imaginé, consécutif à un incendie d'entrepôt, les surfaces potentiellement touchées sont indiquées dans le tableau ci-après.

Ces surfaces indiquées sont les surfaces occupées par les terres et non par la mer. En effet, les conséquences radiologiques des rejets sur la mer ne sont ni mesurées ni chiffrées dans cette évaluation socioéconomique. En considérant une dispersion à 360° depuis le site de Marcoule, la surface de mer potentiellement touchée est d'environ 1 450 km².

Tableau 6.4-2 *Récapitulatif des surfaces pour lesquelles des conséquences radiologiques sont chiffrées, autour du site de Marcoule, en cas d'incendie de l'entrepôt*

Périmètre	Surface de l'anneau ou du disque occupé par la terre
P1, périmètre de moins de 30 km de rayon	2 827 km ²
P2, périmètre de 30 à 50 km	5 027 km ²
P3, périmètre de 50 km à 100 km	22 112 km ²
Total	29 966 km²

- Population potentiellement touchée par les conséquences d'un incendie d'entrepôt, avec panache de rejets radioactifs

Le tableau ci-dessous résume le nombre d'habitants concernés par ces 3 périmètres, en cas d'incendie provoquant des rejets radioactifs se propageant dans l'atmosphère et contaminant l'environnement au travers du panache de l'incendie.

Tableau 6.4-3 *Population concernée par les périmètres P1, P2 et P3 autour du site de Marcoule*

Périmètre	Population concernée
P1, périmètre de moins de 30 km de rayon	709 469
P2, périmètre de 30 à 50 km	1 014 411
P3, périmètre de 50 km à 100 km	3 041 189
Total	4 765 069

6.4.4.2 Périmètres concernés sur le site de La Hague

Le site Orano de la Hague est situé dans le département de la Manche. Il comporte près de 4 000 collaborateurs. L'usine de retraitement propose des prestations de recyclage des matières radioactives en vue de leur utilisation future dans de nouveaux combustibles. Les installations disposent de quatre bassins, construits entre 1976 et 1985, servant au refroidissement des combustibles usés en attente des opérations de retraitement. Le site de La Hague abrite également un entreposage de près de 3 000 m³ (avant extension 2017) de déchets HA, et près de 29 200 m³ de déchets MA-VL (cf. Tableau 5.1-10).

- Surfaces potentiellement touchées par un incendie d'entrepôt à La Hague, avec panache de rejets radioactifs

Le tableau 6.4-4 ci-dessous estime ces surfaces.

Comme pour le site de Marcoule, les surfaces indiquées sont celles occupées par la terre. En considérant une dispersion à 360°, la surface de la mer potentiellement touchée est très importante (environ 25 700 km²), du fait de la situation littorale du site.

Tableau 6.4-4 Récapitulatif des surfaces pour lesquelles des conséquences radiologiques sont chiffrées, autour du site de La Hague, en cas d'incendie de l'entrepôt

Périmètre	Surface de l'anneau ou du disque occupé par la terre
P1, périmètre de moins de 30 km de rayon	835 km ²
P2, périmètre de 30 à 50 km	1 434 km ²
P3, périmètre de 50 km à 100 km	3 455 km ²
Total	5 724 km²

- Population potentiellement touchée par les conséquences d'un incendie d'entrepôt à La Hague, avec panache de rejets radioactifs

Le tableau 6.4-5 ci-dessous résume le nombre d'habitants concernés par ces 3 périmètres, en cas d'incendie provoquant des rejets radioactifs se propageant dans l'atmosphère et contaminant l'environnement au travers du panache de l'incendie à La Hague.

Tableau 6.4-5 Population concernée par les périmètres P1, P2 et P3 autour du site de la Hague

Périmètre	Population concernée
P1, périmètre de moins de 30 km de rayon	184 380
P2, périmètre de 30 à 50 km	76 453
P3, périmètre de 50 km à 100 km	340 029
Total	600 862

6.5 Coûts unitaires de l'incendie sur un site d'entreposage imaginé

L'exercice d'évaluation des dommages consiste à décrire et quantifier les coûts résultant de l'accident qualifié. La monétarisation s'effectue sur la base des coûts unitaires suivants, qui seront décrits dans la suite du chapitre :

- le coût des réfugiés est lié à l'évacuation des personnes à la suite de l'accident et de leur relogement provisoire ;
- le coût de la remédiation comprend le coût de la décontamination des sols et le coût de la prise en charge des déchets radioactifs générés par les mesures de décontamination ;
- le coût économique direct traduit l'arrêt de l'activité économique sur les territoires sinistrés et donc soustraits à la production par les accidents nucléaires, du fait notamment des mesures d'évacuation et de mise à l'abri ;
- le coût d'image représente la dégradation de l'image de la région dans laquelle l'accident a lieu : impact sur l'image agricole (réduction des volumes d'exportation), sur le tourisme (baisse de fréquentation touristique) et l'industrie (industrie en général et filière électronucléaire en particulier).

Par ailleurs, le coût sanitaire, non évalué dans cette évaluation socioéconomique, entraîne des pertes de vies humaines liées à l'accident et le traitement médical des maladies déclenchées par l'exposition des personnes aux rayonnements et par le stress de l'accident.

6.5.1 Coût des réfugiés

- **Coût brut**

Les réfugiés représentent les personnes évacuées à la suite de l'accident d'entreposage, ces personnes doivent être relogées et bénéficier de produits de première nécessité. Ce coût, en valeur 2019, est estimé à un montant de 100 000 € par personne (86), et correspond à « *l'accueil d'urgence pendant quelques mois au plus, le relogement provisoire en structures de type préfabriqué et enfin le relogement définitif au bout de deux à cinq ans* ».

Par hypothèse dans cette évaluation socioéconomique, il est considéré que ce coût n'intervient que la première année. L'assiette considérée correspond à la population du périmètre 1 (zone d'évacuation, rayon de 30 km).

Tout comme pour l'évaluation des coûts de différentes options, il convient de s'interroger à la fois sur la plage de valeurs que ce coût peut adopter, ainsi que sur son évolution dans le temps.

- **Évolution des coûts relatifs** (cf. chapitre 3.2.3 du présent document)

Concernant l'évolution dans le temps, nous supposons que le coût des réfugiés est assimilable à un flux de type génie civil, dont l'élasticité au PIB est détaillée au chapitre 3.2.3.2 du présent document.

6.5.2 Remédiation : les coûts de décontamination

- **Coût brut**

Le coût de la remédiation comprend la décontamination des sols et la prise en charge des déchets radioactifs générés par les mesures de décontamination.

Comme le suggère le retour d'expérience de Fukushima, dont les données sont disponibles dans le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) et du ministère de l'environnement japonais, il est considéré que les périmètres les plus proches de l'accident nécessitent d'engager des dépenses de décontamination. Par ailleurs, sur ces périmètres, on observe selon la nature des

éléments contaminés une production de déchets exprimée en tonnes et mètres cubes au km² plus élevée que sur les périmètres les plus éloignés.

Les moyens mis en œuvre pour décontaminer les sols, les cours d'eau et les bâtiments ne sont pas les mêmes selon les doses constatées. Ils sont plus coûteux sur des zones présentant de fortes doses de radiations.

Pour le périmètre P1, plus proche du lieu de l'accident, les coûts de décontamination correspondent aux coûts recensés dans la « zone de décontamination spéciale » (SDA) autour de Fukushima. Quant aux périmètres P2 et P3, nous avons considéré que le coût au km² serait similaire à celui des autres zones contaminées par les rejets radioactifs de Fukushima (zone ICSDA). La Figure 6-3 ci-dessus représente graphiquement les aires des différentes zones définies.

Les surfaces occupées par la mer ne sont pas prises en compte, considérant par hypothèse qu'il n'y a pas de décontamination effectuée sur le milieu marin. Cette remarque concerne particulièrement le site de La Hague.

Les coûts de décontamination des sols sont déterminés en s'appuyant en premier lieu sur le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82), qui fournit, pour les exercices fiscaux compris entre 2011 et 2015, les budgets alloués et non-utilisés pour la gestion de la décontamination, hors gestion des déchets.

Toutefois, ce rapport ayant été publié avant la fin des actions de remédiation, les coûts de décontamination des sols y sont fortement sous-estimés. Le ministère de l'environnement japonais propose une mise à jour des coûts de décontamination en 2018 (83). Ceux-ci atteindraient environ 1,5 trillions de yen pour la zone SDA (spécial décontamination area), et 1,4 trillion de yens pour la zone ICSDA (intensive contamination survey area) pour la période 2011-2017.

En divisant simplement le budget alloué par les surfaces des zones SDA (1 166 km²) et ICSDA (24 000 km²), on obtient ainsi :

- ✓ un coût de décontamination de 10,3 millions d'euros par km² pour la zone SDA ;
- ✓ un coût de décontamination de 467 mille euros par km² pour la zone ICSDA. Si ces coûts sont plus récents, et que le rapport du ministère de l'environnement indique un quasi achèvement de la décontamination de la zone ICSDA, l'avancement de la décontamination de la zone SDA n'est pas précisée. À défaut de plus d'informations, nous mobilisons les coûts par km² estimés à partir des données les plus récentes, tout en sachant qu'il s'agit encore probablement d'une sous-estimation.

- **Évolution des coûts relatifs** (cf. chapitre 3.2.3 du présent document)

Ce poste des coûts de décontamination est assimilé à des flux de type génie civil.

6.5.3 Les coûts de prise en charge des déchets radioactifs générés par les mesures de décontamination

Outre les coûts directs de décontamination, les actions de décontaminations décrites dans le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) et mises en place à Fukushima, génèrent de nouveaux déchets radioactifs (gravats, terres, poussières, végétaux, etc.) qui doivent être stockés et traités, engendrant des coûts supplémentaires, inclus dans les actions de remédiation.

6.5.3.1 Typologie des déchets produits au sein de la préfecture de Fukushima

À Fukushima, les déchets produits par l'accident et les actions de remédiation suite à l'accident sont divisés en plusieurs catégories :

- les déchets issus de la « zone de contremesure » et les « déchets désignés » constituent la catégorie des « **déchets spécifiés** » (85) :
 - ✓ les déchets **issus de la « zone de contremesure »** (ex-zone restreinte et zone d'évacuation délibérée) : correspondent aux déchets du tsunami, des débris des maisons touchées par le tsunami et des déchets de nettoyage des résidences suivant l'évacuation de long terme. Cette zone correspond à la SDA (spécial décontamination area);
 - ✓ les « **déchets désignés** » : déchets contaminés au-delà du seuil de 8 000 Bq/kg, tels que les boues d'épuration et les cendres d'incinération. Il s'agit là de déchets collectés dans la zone ICSEA (intensive contamination survey area) ;
- les déchets autres que les déchets spécifiés, c'est-à-dire soit ceux qui n'ont pas pour origine la « zone de contremesure », soit ceux dont la contamination est en-dessous du seuil de 8 000 Bq/kg ;
- enfin, il existe des déchets et terres issus de la décontamination : le sol, l'herbe, les feuilles, les branches, les sédiments de surface, etc.

6.5.3.2 Quantité de déchets produits au sein de la préfecture de Fukushima

Le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) estime qu'environ 130 000 tonnes de « déchets désignés » (issus donc de la zone ICSEA) seront *in fine* produits.

De plus, 800 000 tonnes de déchets seraient produites au sein de la zone SDA. Ces déchets étant toutefois en grande partie attribuables à la catastrophe naturelle du tsunami, et donc non extrapolables à un scénario d'accident de type incendie dans un entrepôt tel qu'il est modélisé dans cette évaluation socioéconomique, nous ne tenons pas compte de cette production de déchets au sein de la zone SDA.

La quantité de déchets et de terre issue des activités de décontamination sur la zone s'élèverait de 16 à 22 millions de mètres cubes sur les zones SDA et ICSEA. Le ministère de l'environnement japonais estime la répartition suivante de la radioactivité des déchets issus des activités de décontamination (83) :

- 45,75 % de terres contaminées en dessous du seuil de 8 000 Bq/kg ;
- 47,07 % de terres contaminées entre 8 000 et 100 000 Bq/kg ;
- 0,04 % de terres contaminées au-delà de 100 000 Bq/kg ;
- 7,05 % de cendres d'incinération provenant de la décontamination ;
- 0,09 % de déchets contaminés au-delà de 100 000 Bq/kg au sein de la zone de contremesure.

Le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) ne donnant aucun détail de coût concernant la gestion des déchets, l'estimation a consisté à transposer dans la classification française des déchets radioactifs les volumes de déchets produits par l'accident, en fonction des fourchettes de niveau de radioactivité (Bq/kg). Puis, le coût de gestion des déchets TFA issus du document « PNGMDR 2013-2015 – Schéma industriel pour la gestion des déchets TFA » de l'Andra (87) est appliqué pour estimer le coût de gestion des déchets produits par un incendie fictif d'entrepôt.

La classification des déchets radioactifs en France en fonction de leur activité massique est la suivante (88) :

Tableau 6.5-1 La classification des déchets radioactifs en France sur le critère d'activité massique

Catégorie	Niveau de radioactivité
Très faible activité (TFA)	Inférieure à 10 000 Bq/kg
Faible activité (FA)	Compris 10 000 et 1 milliard de Bq/kg
Moyenne activité (MA)	Compris entre 1 milliard et 1 000 milliards Bq/kg
Haute activité (HA)	Supérieur à 1 000 milliards Bq/kg

En suivant cette classification de déchets, les hypothèses conservatrices ci-dessous sont posées :

- Les déchets dont la radioactivité est simplement présentée comme « supérieure à 100 000 Bq/kg » par le ministère de l'environnement japonais sont des déchets de faible activité ;
- La quantité totale de déchets produits correspond à la borne basse des estimations du ministère de l'environnement japonais, c'est-à-dire 16 millions de mètres cubes, nous obtenons la répartition suivante des déchets selon la classification française. Les hypothèses de production par kilomètre carré ont été estimés en mobilisant la surface ICSEA au sein de la préfecture de Fukushima (12 617 km²) et SDA (1 166 km²), égal à la superficie de la préfecture (13 683 km²).

On obtient les volumes de déchets radioactifs suivants, générés sur le périmètre de la préfecture de Fukushima :

Tableau 6.5-2 Volumes de déchets produits par l'accident de Fukushima, sur le périmètre SDA et ICSEA inclus dans la préfecture de Fukushima, selon leur niveau de radioactivité exprimé en classification française

Type de déchets		En m ³	En m ³ par km ²
Déchets de très faible activité	Terre (< 8 000 Bq/kg)	7 319 691	730
	Terre (entre 8 000 et 100 000 Bq/kg)	7 530 696	751
Déchets de faible activité	Terre (> 100 000 Bq/kg)	7 276	0,73
	Cendres d'incinération	1 127 785	112
	Déchets (> 100 000 Bq/kg)	14 552	1,5
	Déchets désignés (zone ICSEA uniquement)	515 637	40,87
Volume total des déchets de faible activité		9 195 946	906

6.5.3.3 Quantité et typologie des déchets produits à l'extérieur de la préfecture de Fukushima

Outre les 16 millions à 22 millions de mètres cubes de déchets produits au sein de la zone SDA et ICSA, le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) mentionne également que 28 000 tonnes de déchets désignés et 1,4 millions à 13 millions de mètres cubes de déchets issus des actions de décontamination seront générés hors de la préfecture de Fukushima.

Les déchets désignés étant contaminés au-delà du seuil de 8 000 Bq/kg, nous posons l'hypothèse que ceux-ci seraient classifiés comme des déchets de faible activité.

Concernant les déchets issus des actions de décontamination, nous posons les hypothèses conservatrices suivantes, une classification des déchets en fonction de leur radioactivité n'ayant pu être localisé :

- l'ensemble des déchets seraient classifiés en déchets de très faible activité, au vu de l'éloignement du lieu de l'accident ;
- comme pour les déchets provenant de la préfecture de Fukushima, nous mobilisons l'hypothèse de production de déchets la plus conservatrice, équivalente à la borne basse de 1,4 millions de mètres cubes.

En extrapolant ces quantités de déchets au cas d'un incendie fictif, la répartition des déchets selon la classification française serait dès lors celle rapportée dans le tableau 6.5-3 ci-dessous.

Pour la superficie concernée, nous nous basons sur une surface de 11 383 km², correspondant à la surface estimée de la zone ICSA hors de la préfecture de Fukushima.

Tableau 6.5-3 *Volumes de déchets produits par l'accident de Fukushima, sur le périmètre à l'extérieur de la préfecture de Fukushima, selon leur niveau de radioactivité exprimé en classification française*

Type de déchets		En m ³	En m ³ par km ²
Déchets de très faible activité	Déchets issus des actions de décontamination	1,4 millions	122,9
Déchets de faible activité	Déchets désignés	91 960	8,08

6.5.3.4 Extrapolation des quantités au cas des périmètres étudiés en France

Maintenant que les quantités de déchets produites, dans la préfecture de Fukushima et à l'extérieur, sont converties en unités correspondantes aux catégories de déchets françaises, il convient d'extrapoler les quantités produites à Fukushima aux quantités qui seraient produites en France si un incendie survenait, en fonction des périmètres qui ont été estimés au chapitre 6.4.3 du présent document.

Nous supposons que (cf. Figure 6-3):

- la quantité de déchets par km² produite au sein des zones P 1 et P 2 serait similaire à la quantité de déchets produite par km² au sein de la préfecture de Fukushima ;
- la quantité de déchets par km² produite au sein de la zone P 3 serait similaire à la quantité de déchets par km² produite à l'extérieur de la préfecture de Fukushima.

6.5.3.5 Coût de gestion des déchets radioactifs

- **Coût brut de gestion des déchets radioactifs de très faible activité (TFA)**

Le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique (82) ne donnant aucun détail de coût concernant la gestion des déchets, nous nous appuyons sur le coût de gestion des déchets TFA issu du document « PNGMDR 2013-2015 – Schéma industriel pour la gestion des déchets TFA » de l'Andra (87). Celui-ci décrit les coûts de fonctionnement du centre de stockage actuel des déchets TFA, le Cires. Ce centre, dimensionné pour accueillir 650 000 m³ de déchets TFA sur 30 ans, a représenté un coût d'investissement d'environ 40 millions d'euros 2002. Les coûts de fonctionnement s'élèvent à environ 10 millions d'euros par an, en fonction des volumes traités. En outre, le document indique un coût moyen de stockage de 500 € par m³, incluant l'amortissement des investissements.

- **Coût brut de gestion des déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)**

Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte sont stockés en surface dans les centres de l'Aube (en cours de fonctionnement) et de la Manche (en phase de fermeture).

Les données de coûts disponibles pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte concernent le coût complet (comprenant l'investissement initial et les coûts annuels de fonctionnement) du stockage des déchets FMA-VC. Ce coût s'élève à environ 5 000 € par m³ (incluant donc également le coût de déchets de moyenne activité).

- **Évolution des coûts relatifs** (cf. chapitre 3.2.3 du présent document)

Les postes de coûts de gestion des déchets radioactifs (TFA et FMA-VC) sont assimilés à des flux de type génie civil.

6.5.4 Coût d'image, coût économique direct et de ressenti

- **Coût brut**

Les mesures d'évacuation et de mise à l'abri impliquent un arrêt de l'activité économique sur les territoires sinistrés par les accidents nucléaires. De plus, un accident nucléaire peut entraîner une dégradation de l'image de la région dans laquelle l'installation est implantée, notamment en termes de retrait de la consommation de produits agricoles et de séjours à risque. Ainsi, les exportations de la région de Fukushima et le tourisme ont fortement diminué dans les années qui ont suivi l'accident nucléaire.

Il est toutefois complexe d'estimer précisément les coûts économiques après un accident sur un entrepôt. L'IRSN considère trois types de coûts économiques :

- ✓ l'impact sur le tourisme : environ 25 milliards d'euros en cas d'accident grave, et 75 milliards d'euros en cas d'incident majeur ;
- ✓ l'effet d'image qui comporte plusieurs composantes :
 - l'effet d'image industrielle, concernant à la fois l'industrie en général et l'industrie électronucléaire en particulier, chiffré entre 12 milliards d'euros pour l'accident grave et 46 milliards d'euros pour l'accident majeur ;
 - l'effet d'image agricole, concernant la réduction de la demande pour les produits agricoles français, même non-contaminés, est compris entre 13 et 60 milliards d'euros ;
- ✓ les coûts unitaires des zones d'exclusion, concernant à la fois la valeur de la production perdue et le ressenti des habitants dont le territoire devient une zone d'exclusion, estimés à 10 millions d'euros par kilomètre carré. Les zones d'exclusions représentent ici « *les territoires fortement contaminés que les populations doivent quitter pour de nombreuses années. En se référant au cas de l'accident de Tchernobyl, elles correspondent à des dépôts en ¹³⁷Cs supérieurs à 555 kBq/m². Après l'accident de Fukushima, les autorités japonaises ont basé leurs décisions sur des critères de dose qui correspondent à des niveaux d'activité très voisins.* »

Hypothèse retenue pour la monétarisation du coût d'image : si nous prenons la borne basse du coût de l'impact sur le tourisme, sur l'image industrielle et sur l'image agricole, nous pouvons déjà appliquer à chaque accident un coût forfaitaire de 50 milliards d'euros, que nous appliquons l'année de l'accident.

Hypothèse retenue pour la monétarisation du coût économique direct et de ressenti des populations : le coût économique direct (perte de production) et de ressenti des populations (dont le territoire devient une zone d'exclusion) est évalué à 10 millions d'euros par kilomètre carré de zone d'exclusion, que nous supposons égal à l'aire délimitée par le périmètre P1, et survenant, pour faciliter la modélisation, l'année de l'accident (une répartition sur 10 ans ou 15 ans ne devant *a priori* pas présenter d'impact majeur sur le résultat).

- **Évolution des coûts relatifs** (cf. Chapitre 3.2.3 du présent document)

Les élasticité au PIB utilisées ici correspondent à celles des flux de type recherche et maintien des compétences.

6.5.5 Coût sanitaire

L'exposition de l'homme à la radioactivité, par voie externe ou interne (inhalation ou ingestion), peut conduire au développement de pathologies (cancer, maladies respiratoires, etc.) se traduisant par une perte d'espérance de vie des individus exposés en fonction du niveau d'exposition. L'accident sur une installation d'entreposage décrit ici causerait de nombreuses pertes de vie et de nombreux cas de pathologies graves liées à l'exposition; l'ampleur de ces dommages sanitaires varierait en fonction d'un ensemble de paramètres, notamment la localisation des zones urbaines les plus proches du site et les conditions météorologiques au moment des rejets. Les victimes de l'accident nucléaire, en plus d'une exposition aux rayonnements ionisants, seraient soumises à une situation stressante induisant de nombreuses inquiétudes sur le présent et l'avenir. Citons par exemple les questions de la fertilité ou les potentielles conséquences sur la santé des fœtus et nouveau-nés qui peuvent surgir au sein de la population vivant dans la région impactée par un accident sur une installation d'entreposage de déchets radioactifs.

En l'absence de données robustes et de références spécifiques à ce type d'installation, nous choisissons de ne pas estimer, ni *a fortiori* de monétariser les conséquences sanitaires d'un accident sur une installation d'entreposage.

Des estimations concernant le coût sanitaire d'un accident en centrale existent : rapport de l'OMS (89) et de l'IRSN (86). Par ailleurs, l'IRSN dans son rapport portant sur la méthodologie de calcul du coût de l'accident (84) indique les cinq composantes principales⁶⁸ et les lignes de coûts détaillées relevant d'un accident en centrale. Les effets sanitaires au sens cancers radio-induits figurent dans la composante des coûts radiologiques hors-site (suite à l'exposition au panache et à l'ingestion de produits contaminés).

Dans le cas d'un accident majeur, le coût sanitaire est estimé à 10 milliards d'euros pour un coût total de l'accident de 450 milliards d'euros, soit 2,2 % du coût de l'accident. Dans le cas d'un accident grave, le coût sanitaire est négligeable.

L'extrapolation de ces données est toutefois délicate dans la mesure où les rejets de radionucléides issus d'un accident en centrale et d'un accident sur une installation d'entreposage diffèrent. L'estimation complète de l'impact sanitaire, hors possibilité de s'appuyer sur des expériences passées, est hors du périmètre de cette évaluation. Ainsi, afin de ne pas commettre de biais, nous préférons nous limiter à cette description qualitative de l'impact sanitaire, tout en notant qu'en termes d'impacts humains, l'accident décrit constituerait incontestablement une catastrophe (cf. à ce sujet le chapitre 7.2 du présent document).

⁶⁸ Les composantes du coût indiquées par l'IRSN sont : coûts sur site, coûts des territoires contaminés, coûts radiologiques hors site, coûts d'image et effets sur le parc de production d'électricité

6.5.6 Récapitulatif des coûts unitaires de l'incendie imaginé sur un site d'entreposage

Tableau 6.5-4 Synthèse des données de coûts utilisées dans l'estimation des dommages

Type de coût unitaire	Description	Hypothèse de coût retenu
Coût des réfugiés	Coût lié aux mesures d'évacuation et de relocalisation des populations habitants dans les zones impactées	100 000 euros par réfugié
Coût de remédiation	Coût lié à la décontamination de l'environnement exposé aux rejets radioactifs	10,3 millions d'euros par km ² pour la zone P1 467 mille euros par km ² pour les zones P2 et P3
Coût de gestion des déchets	Coût lié à la gestion des déchets radioactifs générés	500 euros par m ³ pour les déchets TFA 5 000 euros par m ³ pour les déchets FMA
Coût d'image, coût économique direct et de ressenti	Coût d'image, coût lié à l'arrêt de l'activité économique sur les territoires concernés par les accidents nucléaires, et de ressenti de la population	50 milliards d'euros pour le coût d'image 10 millions d'euros par km ² pour le coût économique direct et de ressenti des populations
Coût sanitaire	Coût intégrant les décès dus à l'accident, les coûts directs des soins (dépenses de la sécurité sociale) et l'impact sur la perte de qualité de vie (stress post traumatique ou maladies déclenchées par l'accident)	Non estimé

6.5.7 Coût brut appliqué au cas de Marcoule

Tableau 6.5-5 Coût estimé d'un accident fictif sur le site d'entreposage de Marcoule

Typologie de coût	P1 Périmètre d'évacuation (< 30 km)	P2 Périmètre de mise à l'abri des populations (de 30 à 50 km)	P3 Périmètre de gestion post-accidentelle (de 50 à 100 km)	Total
Coût des réfugiés	70 947 M€	-	-	70 947 M€
Coût de la remédiation	29 099 M€	2 345 M€	10 319 M€	41 763 M€
Coût de gestion des déchets	44 053 M€			44 053 M€
Coûts d'image	50 000 M€			50 000 M€
Coût économique direct et de ressenti des populations	28 274 M€	-	-	28 274 M€
Coût brut total				235 037 M€

6.5.8 Coût brut appliqué au cas de La Hague

Tableau 6.5-6 Coût estimé d'un accident fictif sur le site d'entreposage de la Hague

Typologie de coût	P1 Périmètre d'évacuation (< 30 km)	P2 Périmètre de mise à l'abri des populations (de 30 à 50 km)	P3 Périmètre de gestion post- accidentelle (de 50 à 100 km)	Total
Coût des réfugiés	18 438 M€	-	-	18 438 M€
Coût de la remédiation	8 598 M€	669 M€	1 612 M€	10 879 M€
Coût de gestion des déchets	12 408 M€			12 408 M€
Coûts d'image	50 000 M€			50 000 M€
Coût économique direct et de ressenti des populations	8 354 M€	-	-	8 354 M€
Coût brut total				100 079 M€

6.5.9 Aléa entourant les coûts unitaires de l'accident

Faute de disponibilité de données, nous nous sommes appuyés, pour estimer les coûts unitaires de l'accident imaginé, sur un retour d'expérience concernant un accident au sein d'une centrale nucléaire, ainsi que sur des modélisations économiques de l'IRSN. Le sens du biais pour une extrapolation vers les conséquences d'un accident au sein d'un entrepôt n'est pas établi, et pourrait ainsi être aussi bien positif que négatif. Par ailleurs, de nombreux coûts liés aux conséquences d'un accident au sein d'un entrepôt nucléaire, et notamment ceux liés aux impacts sur la santé (morbidité et mortalité), n'ont pas été pris en compte dans ce calcul.

Ainsi, la plage d'incertitude entourant les coûts de l'accident imaginé est supposée large, comprise entre [0,8 ; 1,5]. Cette plage est par ailleurs cohérente avec la plage utilisée pour l'ensemble des coûts. Des simulations de type Monte-Carlo sont donc appliquées, avec 10 000 tirages aléatoires.

6.6 Scenarii, probabilités et conséquences d'un incendie en entreposage

6.6.1 Intégration du risque d'accident dans le scénario KO

Le scénario KO correspond à une dégradation économique et/ou sociale qui finit par entraîner une régression institutionnelle. Dans cette hypothétique société chaotique, on ne peut exclure que les normes de sûreté et de sécurité se dégradent. On peut facilement imaginer que cette dégradation puisse être « interne » (réduction des normes de sûreté des installations nucléaires) et/ou « externe » (attaque ou guerre sur le territoire national).

Il n'existe pas de références sur lesquelles s'appuyer pour estimer la probabilité d'un accident dans cet état du monde ; l'hypothèse selon laquelle celle-ci serait significativement supérieure aux normes actuelles de sûreté de 10^{-6} paraît toutefois peu contestable. Nous estimons ainsi le risque d'un accident au sein de ce scénario avec une probabilité comprise entre 10^{-3} et 10^{-4} . Ces probabilités correspondent aux bornes basse et haute du risque d'accident avec rejets massifs pour les réacteurs de première génération, conçus dans les années 1950. Leur utilisation traduit dans le cadre de cette évaluation un recul des standards et du niveau de sûreté des installations.

6.6.1.1 Coût d'un accident induit par une durée d'entreposage supplémentaire de 50 ans (branches 4.4 et 4.7)

Dans les branches 4.4 et 4.7 de l'option 4, le centre de stockage Cigéo est fermé en 2203 et 2208, alors qu'il est fermé en 2155 en option de projet 1 ; on note donc une période différentielle d'une cinquantaine d'années durant laquelle les déchets radioactifs MA-VL restent entreposés et ne bénéficient pas de la protection d'une installation de stockage de sûreté passive.

En comptabilisant un risque d'accident annuel compris entre 10^{-3} et 10^{-4} sur chacun des entrepôts étudiés (Marcoule et La Hague), le coût actualisé de risque d'accident est décrit dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.6-1 Coût actualisé d'un incendie en entreposage

Coût actualisé d'un incendie en entreposage	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Période de risque : 2155-2203 (appliqué à la branche 4.4)	459 M€	1 911 M€	5 402 M€
Période de risque : 2155-2208 (appliqué à la branche 4.7)	489 M€	2 068 M€	5 923 M€

Tableau 6.6-2 Coût actualisé de la branche 4.4, avec et sans accident

Coût actualisé de la branche 4.4	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Coût sans prise en compte d'un accident fictif	14 800 M€	25 586 M€	41 116 M€
Coût avec prise en compte d'un accident fictif	15 259 M€	27 497 M€	46 517 M€

Tableau 6.6-3 Coût actualisé de la branche 4.7, avec et sans accident

Coût actualisé de la branche 4.7	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Branche 4.7 sans prise en compte d'un accident fictif	12 752 M€	21 698 M€	36 189 M€
Branche 4.7 avec prise en compte d'un accident fictif	13 241 M€	23 765 M€	42 112 M€

6.6.1.2 Coût d'un accident induit par un entreposage de longue durée renouvelé des déchets HA et/ou MA-VL (branches 4.5 et 4.8)

Dans la branche 4.5, les déchets MA-VL restent gérés par un entreposage de longue durée renouvelé qui s'apparente à une notion d'entreposage « éternel ». Dans la branche 4.8, cet entreposage de longue durée renouvelé concerne les déchets HA et MA-VL.

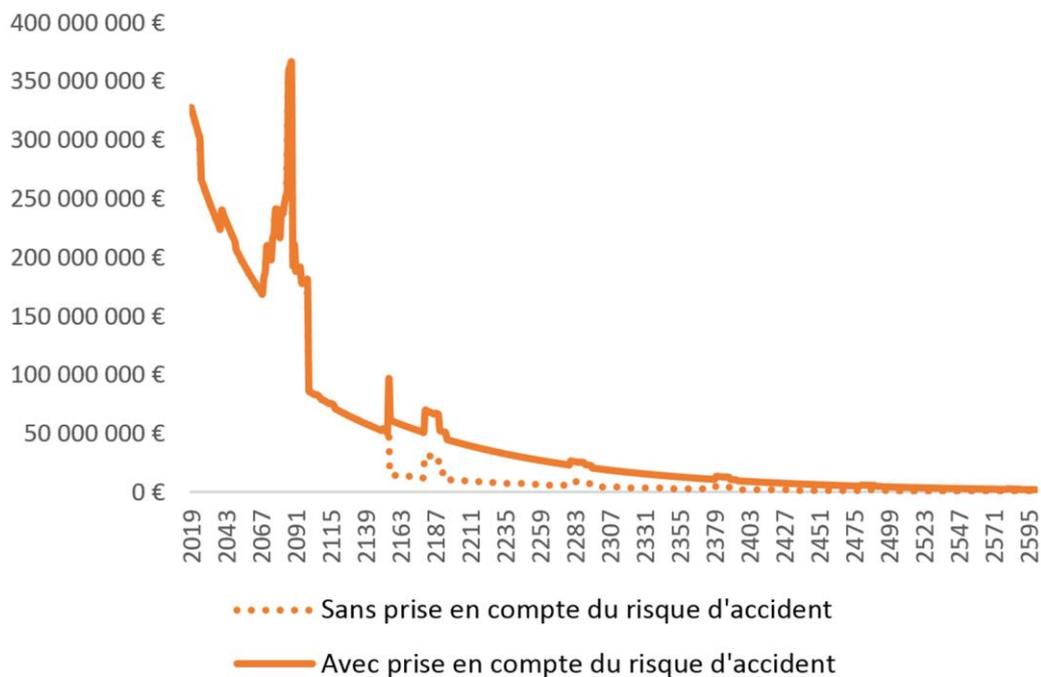
Ainsi, nous introduisons dans ces branches 4.5 et 4.8 un risque d'accident (versus l'option de projet 1), à partir de 2155, à savoir à partir de la date de fermeture de Cigéo en option de projet 1.

En incorporant un risque d'accident annuel compris entre 10^{-3} et 10^{-4} sur chacun des entrepôts étudiés (Marcoule et La Hague), le coût actualisé de risque d'accident s'élève à :

- **896 millions d'euros** pour un taux d'actualisation haut ;
- **5 914 millions d'euros** pour un taux d'actualisation intermédiaire ;
- **34 474 millions d'euros** pour un taux d'actualisation bas.

Tableau 6.6-4 Coût actualisé de la branche 4.5, avec et sans accident

Coût actualisé de la branche 4.5	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Coût sans prise en compte d'un accident fictif	14 197 M€	24 287 M€	45 158 M€
Coût avec prise en compte d'un accident fictif	15 093 M€	30 202 M€	79 632 M€

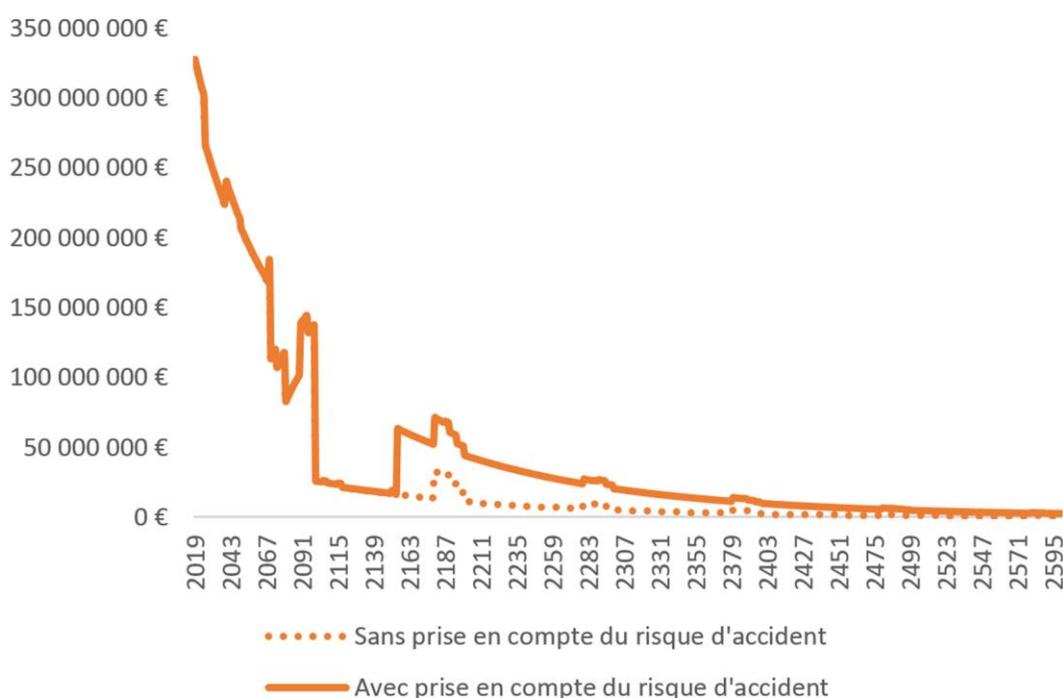


CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0034-A

Figure 6.6-1 Coût actualisé de la branche 4.5, avec et sans prise en compte du risque d'accident, taux intermédiaire

Tableau 6.6-5 Coût actualisé de la branche 4.8, avec et sans accident

Coût actualisé de la branche 4.8	Taux d'actualisation haut	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation bas
Coût sans prise en compte d'un accident fictif	11 739 M€	18 637 M€	35 842 M€
Coût avec prise en compte d'un accident fictif	12 635 M€	24 552 M€	70 316 M€



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0035-A

Figure 6.6-2 Coût actualisé de la branche 4.8, avec et sans prise en compte du risque d'accident, taux intermédiaire

Pour rappel, ces résultats minorent très probablement le coût de ces branches dans la mesure où seul un incident touchant les déchets MA-VL a pu être modélisé ; les conséquences d'un incident portant sur les déchets HA n'ont pas été estimées au sein de cette évaluation.

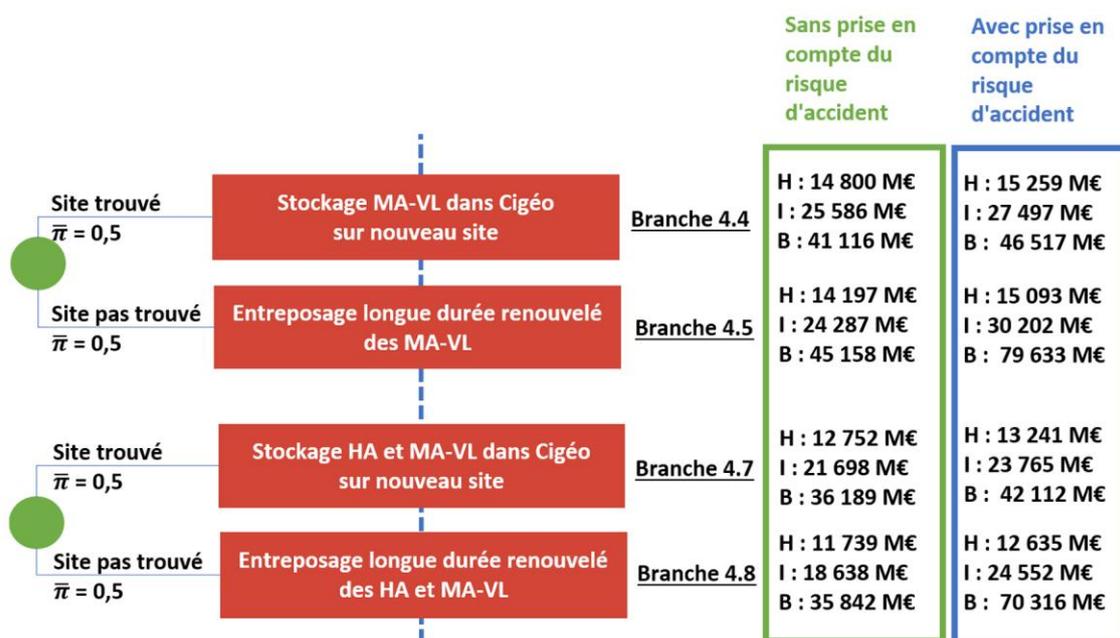
6.6.1.3 Espérance de l'option avec prise en compte d'un accident

Avec la prise en compte d'un accident fictif, le choix optimal pour le décideur public au sein de l'option 4 est modifié. Pour rappel, en scénario KO, le choix optimal (en termes uniquement de solution la moins coûteuse entre les différentes branches de cette option 4) sans prise en compte d'un accident est le suivant (cf. chapitre 5 du présent document) :

- avec un taux d'actualisation élevé, le choix optimal au sein de cette option est de ne mettre en place aucune solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs même si une technologie prospective et un site sont trouvés et de gérer les déchets HA et MA-VL par de l'entreposage de longue durée renouvelé, pour un coût moyen de 11 739 millions d'euros.

- avec un taux d'actualisation intermédiaire, le choix le moins coûteux au sein de l'option est également de ne mettre en place aucune technologie prospective, même si une technologie et un site sont trouvés et de gérer les déchets HA et MA-VL par de l'entreposage de longue durée renouvelé, pour un coût moyen de 18 638 millions d'euros ;
- avec un taux d'actualisation bas, le choix le moins coûteux est la mise en place du centre de stockage Cigéo en 2070 si le site de Meuse/Haute-Marne est conservé, et l'entreposage de longue durée renouvelé si le site est perdu. L'espérance de la branche s'élève à 34 455 millions d'euros.

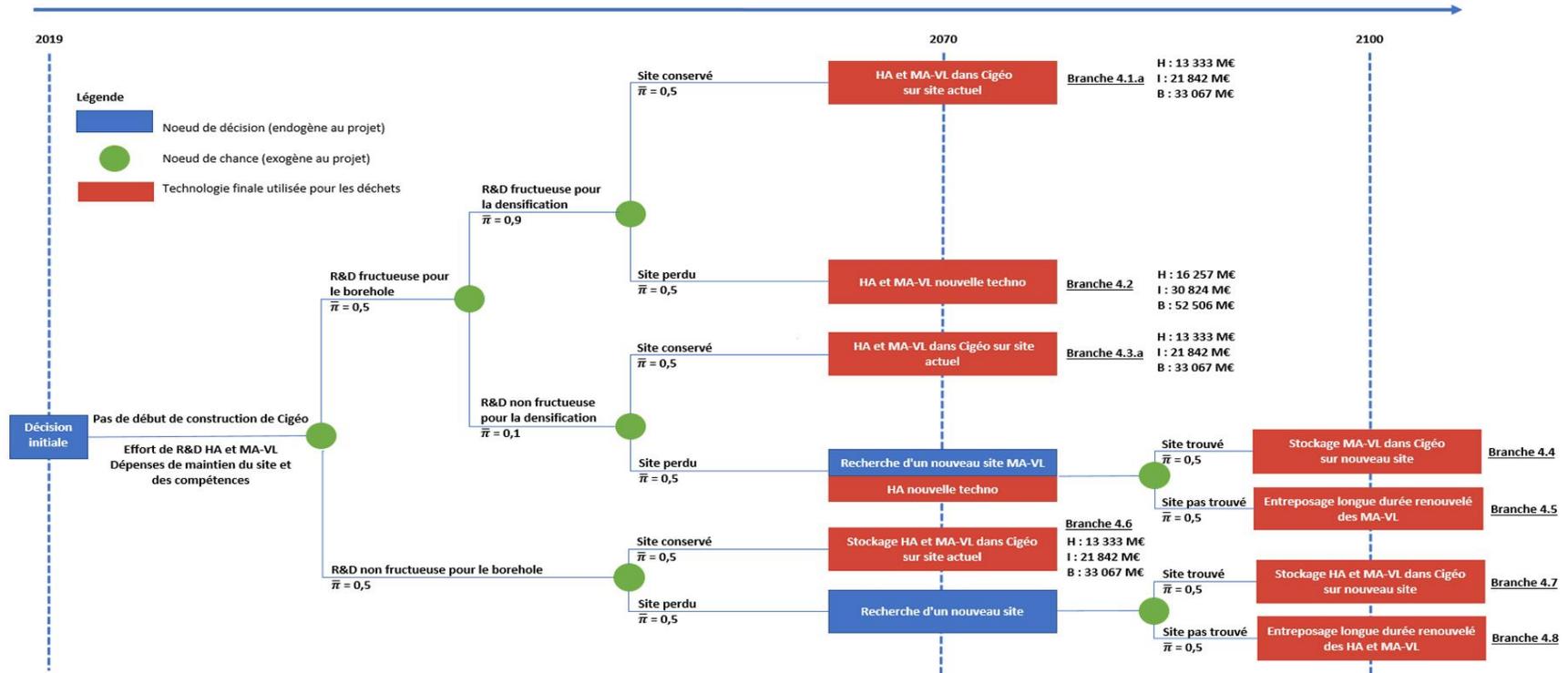
Avec la prise en compte d'un accident fictif, les branches d'entreposage de longue durée renouvelé deviennent beaucoup plus coûteuses (voir Figure et tableau ci-après). L'ordre de préférence des branches au sein de l'option est ainsi modifié.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0062-B

Figure 6.6-3 Zoom sur les branches 4.4, 4.5, 4.7, 4.8 modifiées par la prise en compte d'un accident, en scénario KO

Option de projet 4



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0063-B

Figure 6.6-4 Option 4 avec prise en compte des coûts d'un accident en scénario KO, représentation uniquement des branches optimales à chaque nœud de chance

Avec le taux d'actualisation élevé, le meilleur choix, au sein de l'option 4, pour le décideur public préférant minimiser le coût est l'entreposage de longue durée renouvelé. La valeur espérée de l'option est donc tout simplement égale à la valeur espérée de la branche, soit 12 636 millions d'euros.

Avec un taux d'actualisation intermédiaire, la situation optimale au sein de l'option 4, n'est plus l'entreposage de longue durée renouvelé, mais la mise en place du centre de stockage Cigéo en 2070 sur le site de Meuse/Haute-Marne (21 842 M€). Le maintien du site n'étant pas garanti ; avec une probabilité en moyenne de 0,5, le site de Meuse/Haute-Marne est perdu. La seconde meilleure option est alors de relancer une recherche de site pour Cigéo en 2070. Si un site est trouvé en 2100, Cigéo est mis en œuvre sur ce site (23 765 M€) ; si un site n'est pas trouvé, le décideur a recours à l'entreposage de longue durée (24 552 M€). L'espérance de l'option est alors de 23 006 M€.

Avec un taux d'actualisation bas, la situation optimale au sein de l'option 4 est encore la mise en place du centre de stockage Cigéo en 2070 sur le site de Meuse/Haute-Marne (33 067 M€). Le cheminement optimal si le site est perdu est toutefois modifié. En effet, si le site est perdu, mais qu'une technologie prospective (et son site) est identifiée, il est préférable de mettre en œuvre la technologie prospective (52 506 M€). Si le site de Meuse/Haute-Marne est perdu et qu'aucune technologie prospective n'est trouvée, alors le décideur lance une nouvelle recherche de site pour Cigéo en 2070. Si un site est trouvé en 2100, Cigéo est mis en œuvre sur ce site (42 112 M€) ; si un site n'est pas trouvé, le décideur a recours à l'entreposage de longue durée (70 316 M€). L'espérance de l'option est alors de 43 825 M€.

► VARIANTE DE L'OPTION 4 SANS R&D : QUEL COÛT DE LA VARIANTE EN TENANT COMPTE DE LA PROBABILITE D'ACCIDENT ?

Dans cette variante de l'option 4, l'abandon de la recherche d'une solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs est introduit dès 2019. Le risque d'accident apparaît comme pour les branches 4.5 et 4.8 à partir de 2155, et est comptabilisé jusqu'à la fin de la période d'étude (uniquement dans le scénario KO, comme pour les autres options) :

Ainsi, en scénario KO :

- avec un taux d'actualisation élevé, le coût de cette variante intégrant l'accident s'élève à 4 473 millions d'euros (versus 3 577 millions d'euros sans prise en compte de l'accident) ;
- avec un taux d'actualisation intermédiaire, ce coût s'élève à 14 221 millions d'euros (versus 8 306 millions d'euros sans prise en compte de l'accident) ;
- avec un taux d'actualisation faible, ce coût s'élève à 58 310 millions d'euros (versus 23 836 millions d'euros sans prise en compte de l'accident).

6.6.2 Comparaison avec l'option de projet 1

Les coûts de l'option 4 tenant compte de la probabilité d'accident sont désormais comparés (raisonnement différentiel requis par l'évaluation socioéconomique) à l'option de projet 1, dans un scénario KO. Les comparaisons sont effectuées dans un premier temps, avec la borne haute du taux d'actualisation, avec le taux intermédiaire, puis avec la borne basse.

Rappelons qu'un signe positif, dans la troisième colonne des tableaux ci-dessous, indique que l'option de projet 1 est l'option au coût global actualisé le plus bas ; alternativement, un signe négatif indique que l'option 4 aboutit à un coût global actualisé inférieur au coût global actualisé de l'option de projet 1

Tableau 6.6-6 *Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation élevé, en scénario KO*

Scénario KO Actualisation haute	Valeur moyenne espérée	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global le plus faible
Option de projet 1	11 646 M€		
Option 4	12 636 M€	990 M€	65 %

La comparaison des coûts de l'option 4 avec l'option de projet 1 est désormais effectuée en utilisant la borne intermédiaire du taux d'actualisation :

Tableau 6.6-7 *Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation intermédiaire, en scénario KO*

Scénario KO Actualisation intermédiaire	Valeur moyenne espérée	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global le plus faible
Option de projet 1	16 741 M€		
Option 4	23 006 M€	6 265 M€	99 %

La comparaison des coûts de l'option 4 avec l'option de projet 1 est enfin effectuée en utilisant la borne basse du taux d'actualisation :

Tableau 6.6-8 *Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation bas, en scénario KO*

Scénario KO Actualisation basse	Valeur espérée	Différentiel moyen de coût actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global le plus faible
Option de projet 1	22 835 M€		
Option 4	43 825 M€	20 990 M€	100 %

En scénario KO, l'option de projet 1 l'emporte sur l'option 4, quel que soit le taux d'actualisation.

► **VARIANTE DE L'OPTION 4 SANS R&D : QUEL DIFFÉRENTIEL DE COÛT AVEC L'OPTION DE PROJET 1 ?**

En scénario KO, c'est-à-dire avec la prise en compte d'un accident, la préférence pour l'option de projet 1 (versus la variante de l'option 4) dépend de la valeur du taux d'actualisation :

- avec un taux d'actualisation élevé, le delta moyen s'élève à - 7 173 millions d'euros ; la variante de l'option 4 est favorable dans 100 % des cas ;
- avec un taux d'actualisation intermédiaire, le delta moyen s'élève à - 2 520 millions d'euros ; l'option de projet 1 est favorable dans 42 % des tirages effectués ;
- avec un taux d'actualisation faible, le delta moyen s'élève à 35 475 millions d'euros ; l'option de projet 1 est favorable dans 99 % des cas.

7

Résultats de l'évaluation socioéconomique, mise en perspective et recommandations

7.1	Recueil quantitatif des résultats de l'évaluation socioéconomique	224
7.2	Discussion et mise en perspective des résultats de l'évaluation socioéconomique	232
7.3	Observations finales et recommandations sur l'évaluation socioéconomique appliquée à la gestion des déchets radioactifs	241

L'évaluation socioéconomique permet de déterminer, par la comparaison chiffrée des coûts et bénéfices de différentes options, si l'une d'entre elles est souhaitable. En d'autres termes, cette méthode vise à éclairer l'opportunité de la dépense publique, en fonction des différentes options considérées. Pour cela, les coûts et les bénéfices doivent être évalués, même s'ils s'étalent sur une très longue période. Ils sont appréciés du point de vue de l'ensemble de la collectivité et non pas du point de vue uniquement du porteur de projet. Enfin, les coûts et bénéfices en question ne sont pas exclusivement de nature financière, mais peuvent également relever de dimensions sociale, sanitaire, environnementale.

L'évaluation socioéconomique nécessite de prendre en référence l'objet de l'investissement considéré, qui est qualifié d'« option de projet » : en l'occurrence, il s'agit de la réalisation par l'Andra du centre de stockage Cigéo sur le site de Meuse/Haute-Marne, selon les termes de la loi. Cette option de projet est désignée comme l'« option de projet 1 » dans le rapport. Elle est comparée à des options alternatives, appelées options 2, 3 et 4. Les options de projet considérées dans cette évaluation socioéconomique peuvent être résumées comme suit :

- **L'option de projet 1** prévoit que les premiers investissements du centre de stockage Cigéo : construction initiale ainsi que la phase industrielle pilote soient lancés, après avis favorable de l'ASN. À partir de 2040, si les autorisations sont obtenues, les déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL) y sont stockés, puis à partir de 2080, les déchets radioactifs de haute activité (HA). La phase de fermeture démarre vers 2145, dure environ 10 ans et laisse la géologie prendre le relais de l'intervention humaine.
- **L'option 2** désigne une configuration où, après réalisation des premiers investissements du centre de stockage Cigéo, seuls les déchets MA-VL sont stockés dans un premier temps à partir 2040. Dans cette option, l'hypothèse est posée d'un temps dédié à de la R&D supplémentaire pour trouver une autre technologie de mise en sécurité définitive⁶⁹ pour les déchets HA avec son site afférent. La décision de gestion pour ces déchets est prise en 2070 : en fonction des résultats de la recherche, soit la solution prospective est mise en œuvre pour les déchets HA, soit ceux-ci sont finalement stockés dans le centre de stockage Cigéo.
- **L'option 3** désigne une configuration où les premiers investissements du centre de stockage Cigéo sont également réalisés, mais sans enclenchement en 2040 du stockage des déchets MA-VL. En parallèle, jusqu'en 2070, des efforts de R&D sont entrepris en vue de trouver une solution définitive, autre que Cigéo, pour la gestion à la fois des déchets HA et des déchets MA-VL. Plusieurs possibilités s'ouvrent alors en fonction du succès desdites recherches et du coût des différentes solutions de gestion.
- **L'option 4** enfin, désigne une configuration où les premiers investissements du centre de stockage Cigéo ne sont pas réalisés, ce qui conduit à considérer un report de décision avec en parallèle, des efforts de R&D réalisés pour trouver une autre solution de mise en sécurité définitive des déchets HA et des déchets MA-VL. Les résultats de cette R&D ne sont pas garantis. Par ailleurs, le report de la décision introduit une probabilité de perte du site d'implantation du centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne. Au final, 12 branches, dont 8 distinctes, se dessinent, en fonction du risque de la perte du site actuel du centre de stockage Cigéo, de l'issue de la R&D pour les déchets HA, de l'issue de la R&D pour les déchets MA-VL, et le cas échéant de l'issue de la recherche d'un nouveau site d'implantation pour le centre de stockage Cigéo. Deux des branches de l'option 4 (branches 4.5 et 4.8) conduisent à de l'entreposage de longue durée renouvelé, qui par définition, ne permet pas une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, puisqu'une surveillance active de l'homme et des investissements réguliers restent nécessaires sur un temps long, sans limite de durée identifiée.

Ces branches, qui contreviennent à l'esprit de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4) et à la directive européenne⁷⁰ n° 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 (21), permettent toutefois de tenir compte de toutes les éventualités, y compris celles qui peuvent paraître inacceptables. Cette modélisation est par nature schématique ; d'autres partis pris auraient pu être envisagés, comme par exemple la poursuite de la recherche au-delà de 2070, jusqu'à ce qu'une technologie de mise

⁶⁹ Rappelons ici qu'une mise en sécurité définitive ou « solution définitive » repose sur un principe de surveillance passive après fermeture, c'est-à-dire ne nécessitant plus d'intervention humaine.

⁷⁰ Directive établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs.

en sécurité définitive et/ou un site soient trouvés, ce qui aurait nécessité de faire des hypothèses supplémentaires et n'aurait pas permis de mettre en évidence les risques associés à l'entreposage *sine die*.

Les comparaisons entre ces options sont réalisées en envisageant deux sociétés futures, l'une caractérisée par une croissance positive stable et des institutions fortes (scénario OK) et l'autre par une croissance en moyenne nulle et une société et/ou des institutions en délitement (scénario KO).

C'est l'horizon de vie inédit des déchets radioactifs qui a poussé à formuler de tels *scenarii*. Le projet du centre de stockage Cigéo est prévu pour être exploité pendant plus d'un siècle avant d'être fermé, afin que la géologie prenne le relais de la surveillance active de l'homme pour assurer le confinement des radionucléides. Mais en l'absence de solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, l'entreposage devrait être renouvelé continuellement et les générations futures auraient à se préoccuper activement, au fil des siècles, de la gestion de ces déchets (surveillance des colis et des sites d'entreposage, renouvellement des installations, reprise des colis usés ou abimés, etc.).

Or, la pérennité des normes de sûreté et de sécurité est une éventualité très discutée dans une société chaotique où la croissance s'effondre, où les institutions s'affaiblissent, où une instabilité est susceptible d'ouvrir le champ à des violences (terrorisme, conflit armé, etc.). Dès lors qu'il s'agit d'imaginer la société dans un futur très lointain, une telle instabilité ne peut être exclue (comme nous l'enseigne l'histoire du continent européen), et il est alors nécessaire de la modéliser pour identifier le dispositif le plus adapté pour gérer les déchets radioactifs, y compris dans un tel contexte.

Pour cette raison, en miroir d'un scénario OK, a été modélisé un scénario KO, où la fragilisation des institutions et de la gouvernance conduit à long terme à un effritement des règles de sûreté et de sécurité. Aucune alternance n'a été envisagée entre les deux *scenarii*, ceux-ci étant volontairement contrastés et persistants dans la durée.

Dans une société stable (scénario OK), les institutions disposent des outils de prévention et de gestion des situations accidentelles. Le risque d'accident grave, mesuré comme la valeur des pertes encourues pondérée par la probabilité de survenue de l'accident, apparaît négligeable dans ce contexte en comparaison des autres grandeurs en jeu dans l'évaluation socioéconomique. Dès lors, dans ce scénario, les options diffèrent seulement par le coût de leur mise en œuvre. *A contrario*, dans le scénario KO, il a été considéré que la probabilité d'accident grave pouvait fortement augmenter, pour passer d'une valeur annuelle de 10^{-6} à une valeur comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} . Ainsi, dans ce scénario, les options diffèrent non seulement par leurs coûts, mais également par leur capacité à protéger des conséquences d'un accident. L'évaluation socioéconomique qualifie de « bénéfice » les dommages évités grâce à certaines options.

Par ailleurs, les coûts de mise en place des différentes options varient selon le scénario retenu, en raison de la corrélation entre coûts et croissance économique, modélisée par l'intégration de prix relatifs.

Rappelons enfin que pour ces deux *scenarii*, une discussion sur le poids à accorder aux coûts et bénéfices futurs a été engagée. Cette discussion a conduit à envisager différents profils de taux d'actualisation :

- une borne haute, certes conforme aux recommandations en vigueur, mais qui écrase fortement les coûts et bénéfices futurs appliquée à un projet aussi exceptionnellement long ;
- une borne basse, qui atténue moins fortement l'importance des flux futurs ;
- et un taux d'actualisation intermédiaire, déterminé comme une valeur comprise entre la borne haute et la borne basse.

Cette approche est apparue comme la plus cohérente en termes méthodologiques eu égard à l'horizon extrêmement lointain qui caractérise la gestion des déchets radioactifs. L'encadré ci-après rappelle les hypothèses sous-jacentes attribuées aux composantes des taux d'actualisation (cf. chapitre 3 et Annexe 14 pour le détail).

► TAUX D'ACTUALISATION ET TEMPS LONG

Pour mémoire, le taux d'actualisation est la somme d'un taux sans risque (r_f) et d'une prime de risque ($\beta\varphi$) ; cette dernière étant le produit de la corrélation entre les flux du projet et l'évolution du PIB⁷¹ (β) et de la volatilité macroéconomique (φ).

$$r = r_f + \beta\varphi$$

Ainsi, **dans le scénario OK** :

L'évolution du taux sans risque est la suivante :

- le taux sans risque haut est calé jusqu'en 2070 sur les recommandations officielles : il est stable à 2,5 %, puis il baisse linéairement pour perdre 1 point de pourcentage en 100 ans, puis baisse à nouveau de 0,5 point sur les 100 années qui suivent, avant d'être stable à 1 % à partir de 2270 ;
- le taux sans risque bas démarre, lui, à 2 %, où il est dans un premier temps stable, puis décroissant, puis à nouveau stable à 0,1 % à partir de 2170 ;
- enfin, le taux sans risque intermédiaire démarre à 2,25 %, il est également stable jusqu'en 2070, il fléchit jusqu'en 2270 à 0,5 %, année à partir de laquelle il est à nouveau stable.

Les bêtas et phi connaissent également des évolutions dans le temps.

Les bêtas sont, dans un premier temps, stables, puis ils diminuent linéairement entre 2070 et 2170, puis ils sont à nouveau stables. Cette tendance baissière donne de la cohérence au fait que le taux de croissance des coûts ou des bénéfices ne soit pas supérieur au taux d'actualisation. Notons qu'une distinction est établie entre les bêtas des flux liés au génie civil et ceux liés à la recherche ou au maintien des compétences. En effet, ces deux types de flux n'ont pas la même élasticité au PIB.

Enfin, phi connaît une évolution à la hausse, conformément aux recommandations du rapport Quinet, qui sont utilisées pour la borne haute ($\varphi = 2$ jusqu'en 2070, puis il augmente linéairement jusqu'à 3 en 2170, puis il est stable au-delà). En borne basse, $\varphi = 1$ puis 2. Dans le taux intermédiaire, $\varphi = 1,5$ puis 2,5.

Le même raisonnement est appliqué **dans le scénario KO**, avec des valeurs toutefois différentes. En particulier, le taux sans risque tient notamment compte des anticipations portant sur la croissance économique (règle de Ramsey). Or dans le scénario KO, la croissance chute dès 2019, jusqu'en 2100, puis elle est nulle.

Dès lors, le taux sans risque haut du scénario KO s'établit à 1,5 % en 2019 et il chute linéairement à 1 % jusqu'en 2100 pour tenir compte d'une certaine préférence pour le présent. Il est ensuite stable. Le taux sans risque intermédiaire chute de 1,25 à 0,5, puis il est stable. Le taux sans risque bas chute de 1 à 0,1 entre 2019 et 2100, puis il est stable.

Les bêtas ont des valeurs de départ identiques à ceux du scénario OK (pour les flux liés au génie civil : 1,5 pour le bêta haut, 0,8 pour le bêta intermédiaire et 0,1 pour le bêta bas ; pour les flux liés à la recherche : 1 pour le bêta haut, 0,5 pour le bêta intermédiaire et 0 pour le bêta bas), mais ils chutent plus rapidement et dès le départ (sauf le bêta bas qui est stable sur toute la durée d'étude) : ils atteignent en 2100 dans le scénario KO la valeur qu'ils atteignent en 2170 en OK (pour les flux liés au génie civil : 0,3 pour le bêta haut, 0,2 pour le bêta intermédiaire ; pour les flux liés à la recherche : 0,1 pour le bêta haut et 0,05 pour le bêta intermédiaire). À partir de 2100, ils sont stables.

Le même raisonnement est appliqué pour les phi qui ont une même valeur de départ qu'en scénario OK, mais qui augmentent dès 2019 pour atteindre le palier en 2100, ce qui est cohérent avec un risque macroéconomique plus élevé en KO.

⁷¹ À travers le coefficient bêta, la prise en compte du risque systémique aboutit à une réduction de la valeur des avantages attendus des investissements si ces avantages sont positivement corrélés avec l'activité économique, dont ils amplifient alors les fluctuations, et vice-versa si la corrélation est négative, auquel cas ils ont un effet stabilisateur bénéfique.

Après calcul, le tableau ci-dessous résume les valeurs de taux d'actualisation appliquées dans les deux scénarii.

Tableau 6.6-1 Les valeurs de taux d'actualisation appliquées dans les deux scénarii

Taux d'actualisation		Scénario OK			Scénario KO	
		Jusqu'en 2070	En 2170	À partir de 2270	En 2019	À partir de 2100
Flux de génie civil	Taux d'actualisation haut	5,5 %	2,4 %	1,9 %	4,5 %	1,9 %
	Taux d'actualisation intermédiaire	3,45 %	1,50 %	1 %	2,5 %	1 %
	Taux d'actualisation bas	2,1 %	0,3 %	0,3 %	1,1 %	0,3 %
Flux de recherche et maintien des compétences	Taux d'actualisation haut	4,5 %	1,8 %	1,3 %	3,5 %	1,3 %
	Taux d'actualisation intermédiaire	3 %	1,13 %	0,63 %	2 %	0,63 %
	Taux d'actualisation bas	2 %	0,1 %	0,1 %	1 %	0,1 %

Le modèle intègre enfin des valeurs d'options qui permettent de tenir compte de l'acquisition d'informations au cours du temps concernant certains paramètres (succès des recherches prospectives, capacité à maintenir en attente le site de Meuse/Haute-Marne, etc.)

Les paramètres essentiels du modèle ainsi que sa philosophie étant résumés, les chapitres suivants sont focalisés sur ses résultats. Le chapitre 7.1 du présent document, s'en tient au recueil quantitatif des résultats du modèle socioéconomique afin de synthétiser une présentation brute et non commentée des résultats, tandis que le chapitre 7.2 de ce document, analyse et discute ces résultats. Enfin, le chapitre 7.3 de ce document, rappelle les limites du modèle et plus généralement de l'évaluation socioéconomique.

7.1 Recueil quantitatif des résultats de l'évaluation socioéconomique

Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque scénario et selon le taux d'actualisation considéré, l'option qui présente le coût moyen espéré le plus faible, parmi les options 1, 2, 3 et 4.

Nous verrons dans le chapitre 7.2 que ce résultat mérite d'être discuté afin de tenir compte d'un éventuel bénéfice assurantiel associé aux solutions de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs.

Tableau 7.1-1 Synthèse des résultats par scénario et taux d'actualisation, avec probabilité d'occurrence sur 10 000 tirages

Taux d'actualisation / Scenarii	Taux d'actualisation bas	Taux d'actualisation intermédiaire	Taux d'actualisation haut
Scénario OK	Option de projet 1 (86 %)	Option 4 (56 %)	Option 4 (65 %)
Scénario KO	Option de projet 1 (100 %)	Option de projet 1 (99 %)	Option de projet 1 (65 %)

Rappelons que l'option de projet 1 consiste en la réalisation du centre de stockage Cigéo, tel que prévu par l'Andra, en réponse à la loi. L'option 4 consiste à réaliser un effort supplémentaire en R&D pour les déchets HA et MA-VL, sans investissement immédiat dans le centre de stockage Cigéo ; elle comporte le double risque de perte du site actuel de Meuse/Haute-Marne et d'échec d'une technologie prospective de mise en sécurité définitive. Les pourcentages correspondent aux résultats issus des 10 000 tirages aléatoires visant à tenir compte des plaques d'aléas sur les coûts.

Les chapitres ci-après détaillent les résultats quantitatifs pour le scénario OK, puis pour le scénario KO.

7.1.1 Résultats dans le scénario OK

Nous nous plaçons ici dans le scénario OK, au sein duquel les institutions sont fiables et les normes respectées, de sorte que la probabilité d'accident lié à la gestion des déchets radioactifs, quelle que soit l'option, est considérée comme négligeable. La modélisation du scénario OK repose donc uniquement sur les coûts des différentes options. Ainsi, les résultats consistent en un différentiel de coût global actualisé des différentes options par rapport à l'option de projet 1 (Cigéo, tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi), détaillés pour chaque taux d'actualisation.

7.1.1.1 Résultats dans un scénario OK, avec un taux d'actualisation bas

Le tableau ci-après résume les différentiels de coûts des options dans le scénario OK, avec une borne basse du taux d'actualisation.

Les chiffres indiqués dans ce tableau tiennent compte du risque d'aléas sur les coûts. La dernière colonne du tableau indique la probabilité que l'option de projet 1 soit préférable aux autres, probabilité qui a été estimée en effectuant 10 000 tirages aléatoires de la valeur des différents paramètres de coûts pour lesquels une plage d'incertitude a été définie (selon la méthode « Monte Carlo »).

Tableau 7.1-2 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne basse du taux d'actualisation*

Scénario OK Actualisation basse	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	14 482 M€	-	-
Option 2	18 225 M€	3 743 M€	100 %
Option 3	20 714 M€	6 232 M€	100 %
Option 4	17 133 M€	2 649 M€	86 %

Le « coût global actualisé espéré » (deuxième colonne) est la moyenne des valeurs optimales (c'est-à-dire des branches aux coûts les plus faibles) multipliées par leur probabilité d'occurrence. Par exemple, la valeur espérée de l'option 4 est de 17 133 millions d'euros : la branche qui aboutit au coût le plus faible est la branche 4.7 (où les déchets HA et MA-VL sont stockés en couche géologique profonde sur un nouveau site recherché après 2070) pour un coût de 17 022 millions d'euros. Cependant, sa probabilité d'occurrence est comprise entre 0,3 et 0,7, en moyenne à 0,5. Il convient donc de tenir compte de la deuxième meilleure branche, au cas où la branche 4.7 ne serait pas disponible, si un nouveau site n'était pas trouvé. La deuxième meilleure branche en termes de coûts est la branche 4.8, c'est-à-dire de l'entreposage de longue durée renouvelé, pour un coût de 17 240 millions d'euros et qui reste une branche disponible par défaut de succès de la branche 4.7 (cf. l'arbre du chapitre 5.5.2.1 du présent document, pour retrouver les détails des coûts des différentes branches).

Nous rappelons également, qu'un signe positif, dans la troisième colonne des tableaux ci-avant et ci-après, indique que l'option de projet 1 est l'option au coût global actualisé le plus bas ; alternativement, un signe négatif indique que les options 2, 3 ou 4 aboutissent à un coût global actualisé inférieur au coût global actualisé de l'option de projet 1.

Ainsi, dans le scénario OK et avec un taux d'actualisation bas, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option de projet 1.

Le différentiel moyen de coût global actualisé des options 2, 3, et 4 par rapport à l'option de projet 1 fait état de valeurs supérieures de l'ordre de 2 à 6 milliards d'euros selon les options.

La probabilité que l'option de projet 1 ressorte comme la moins onéreuse, sur 10 000 tirages, est de 100 % face aux options 2 et 3 et à 86 % face à l'option 4.

7.1.1.2 Résultats dans un scénario OK, avec un taux d'actualisation intermédiaire

Le tableau ci-dessous résume les différentiels de coûts des options, dans le scénario OK, avec une valeur intermédiaire du taux d'actualisation.

Tableau 7.1-3 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, taux d'actualisation intermédiaire*

Scénario OK Actualisation intermédiaire	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	12 544 M€	-	-
Option 2	16 013 M€	3 469 M€	100 %
Option 3	18 042 M€	5 498 M€	100 %
Option 4	12 096 M€	-448 M€	44 %

Dans le scénario OK et avec un taux d'actualisation intermédiaire, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option 4.

Le différentiel moyen de coût global actualisé est faible avec l'option de projet 1 (448 millions d'euros).

La probabilité que l'option 4 ait un coût inférieur à l'option de projet 1 est de 56 % sur 10 000 tirages (en miroir, l'option de projet 1 a un coût inférieur à l'option 4 dans 44 % des tirages). La probabilité que l'option de projet 1 soit plus favorable que les options 2 et 3 est de 100 %.

7.1.1.3 Résultats dans un scénario OK, avec un taux d'actualisation élevé

Le tableau ci-dessous résume les différentiels de coûts des options, dans le scénario OK, avec une borne haute du taux d'actualisation.

Tableau 7.1-4 *Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne haute du taux d'actualisation*

Scénario OK Actualisation haute	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	9 836 M€	-	-
Option 2	12 771 M€	2 935 M€	100 %
Option 3	14 315 M€	4 479 M€	100 %
Option 4	9 019 M€	-817 M€	35 %

Dans le scénario OK et avec un taux d'actualisation haut, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option 4.

Le différentiel moyen de coût global actualisé entre l'option 4 et l'option de projet 1 est relativement faible (817 millions d'euros).

La probabilité que l'option 4 ait un coût inférieur à l'option de projet 1 est de 65 % sur 10 000 tirages (en miroir, l'option de projet 1 a un coût inférieur à l'option 4 dans 35 % des tirages). La probabilité que l'option de projet 1 soit moins coûteuse que les options 2 et 3 avec un taux d'actualisation élevé dans un scénario OK, est de 100 %.

7.1.1.4 Résultats dans un scénario OK, avec valeur d'option

Comme indiqué dans le chapitre 5, le modèle permet également de tenir compte de valeurs d'options. Il s'agit, à travers ces valeurs, de mesurer l'avantage qu'offrent certaines options en termes de flexibilité. Ainsi, une option qui repose sur un choix en 2070 peut apparaître peu attractive aujourd'hui, au vu des valeurs moyennes des paramètres de coûts qui conditionneront ce choix, mais s'avérer plus intéressante en 2070, si les paramètres en question ont évolué favorablement. La valeur d'option permet de tenir compte de cet écart lié à l'acquisition d'information jusqu'en 2070.

Les résultats obtenus sont très voisins de la modélisation sans valeur d'option, en réduisant toutefois les espérances de coût des branches dans lesquelles se produit une acquisition d'information. Cela s'explique au niveau calculatoire, par le traitement qui est opéré. Sans valeur d'option, il consiste à tenir compte de la moyenne des tirages de coûts issus de la simulation de Monte-Carlo, puis de retenir la solution la moins chère (« minimum des moyennes »). Avec les valeurs d'options, le traitement consiste, pour chaque tirage, à retenir directement l'option la moins chère (« moyenne des minimas »).

Les valeurs d'option ne sont appliquées qu'à l'option 4 qui est la plus sensible du point de vue des résultats : en effet, en fonction des *scenarii* et des taux d'actualisation, les résultats peuvent donner une préférence pour l'option de projet 1 ou pour l'option 4. *A contrario*, les options 2 et 3 sont systématiquement et sans ambiguïté, « dominées » par l'option de projet 1, dont le coût actualisé reste inférieur. Compte tenu des résultats avec valeur d'option obtenus pour l'option 4, il est apparu évident que la réduction de coûts des options 2 et 3 liée à l'introduction des valeurs d'option n'aurait pas changé la hiérarchie des options.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de l'option 4, sans et avec application des valeurs d'options et compare les résultats avec ceux de l'option de projet 1, dans le scénario OK.

Tableau 7.1-5 Option 4 sans et avec valeurs d'options en scénario OK et comparaison avec l'option de projet 1

Scénario OK	Option de projet 1	Option 4 sans valeur d'option	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4, sur 10 000 tirages	Option 4 avec valeur d'option	Valeur d'option de l'option 4	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4 avec valeur d'option, sur 10 000 tirages
Taux d'actualisation bas	14 482 M€	17 133 M€	86 %	16 786 M€	347 M€	80 %
Taux d'actualisation intermédiaire	12 544 M€	12 096 M€	44 %	12 096 M€	< 100 k€	43 %

Scénario OK	Option de projet 1	Option 4 sans valeur d'option	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4, sur 10 000 tirages	Option 4 avec valeur d'option	Valeur d'option de l'option 4	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4 avec valeur d'option, sur 10 000 tirages
Taux d'actualisation haut	9 836 M€	9 019 M€	35 %	9 018 M€	< 200 k€	35 %

7.1.2 Résultats dans le scénario KO

Dans le scénario KO, un risque d'accident est introduit pour prendre en compte la fragilité des institutions réduisant la capacité de l'État à décider et à agir, fragilité qui peut aboutir à l'abandon sans surveillance des sites d'entreposage et à l'exposition à des dangers divers : la description qualitative des risques auxquels sont soumises les différentes options met en évidence qu'une des principales différences de risques entre les options concerne l'incendie sur un site d'entreposage après la fermeture de Cigéo, à savoir sur la période post 2155. Avant 2155, les options diffèrent peu, dans un premier temps, en termes d'exposition à un accident ; par ailleurs, la probabilité de survenue d'un accident est conditionnée à une hypothèse de nombreuses années de dégradation des normes et d'abandon des sites d'entreposage.

Ainsi, une probabilité d'accident est prise en compte, issue d'un incendie en entreposage (probabilité distribuée entre 10^{-4} et 10^{-3}), dans les branches 4.5 et 4.8 de l'option 4, qui conduisent à de l'entreposage de longue durée renouvelé⁷². Les options 1, 2 et 3 ne peuvent, quant à elles, donner lieu qu'à une solution de mise en sécurité définitive des déchets, mises en œuvre dans des délais similaires, quelles que soient les branches. Elles ne sont donc pas sujettes à ce risque d'accident.

Les comparaisons entre l'option de projet 1 et les options 2 et 3 reposent uniquement sur les coûts, comme en scénario OK ; en revanche, pour les comparaisons entre l'option de projet 1 et l'option 4, les différences concernent à la fois les coûts de mise en œuvre de la solution et les éventuels coûts consécutifs à un incendie dans les branches menant à de l'entreposage de longue durée renouvelé.

En tenant compte de ce différentiel portant sur le risque d'accident (dont les conséquences ont été estimées *a minima* et en prenant des hypothèses conservatrices) et sur les coûts des différentes options dans ce scénario KO, on obtient les résultats présentés dans les chapitres suivants.

7.1.2.1 Résultats dans un scénario KO, avec un taux d'actualisation bas

Le tableau ci-dessous résume les résultats du scénario KO avec la borne basse du taux d'actualisation.

Les chiffres indiqués dans ce tableau tiennent compte des risques d'aléas de sur- et de sous-estimation des coûts et des bénéfices, gérés *via* des simulations de Monte-Carlo. Par ailleurs, pour rappel, la probabilité d'accident est distribuée entre 10^{-4} et 10^{-3} .

⁷² Les branches 4.4 et 4.7 conduisent à entreposer les déchets radioactifs pendant une période plus longue que les autres branches (hors branches 4.5 et 4.8), en raison du temps dédié à la recherche d'un nouveau site de stockage en couche géologique profonde pour les déchets MA-VL (branche 4.4) ou pour les déchets HA et MA-VL (branche 4.7). In fine, ces branches conduisent bien à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, mais la probabilité d'accident différentielle leur est appliquée jusqu'à ce que les déchets soient effectivement stockés.

Tableau 7.1-6 Récapitulatif des coûts des options de projet, dans un scénario KO, borne basse du taux d'actualisation

Scénario KO Actualisation basse	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	22 835 M€		
Option 2	27 726 M€	4 891 M€	100 %
Option 3	32 678 M€	9 843 M€	100 %
Option 4	43 825 M€	20 990 M€	100 %

Dans le scénario KO et avec un taux d'actualisation bas, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option de projet 1.

Le différentiel moyen de coût global actualisé de l'option de projet 1 avec les options 2, 3, et 4 fait état de valeurs supérieures de l'ordre de près de 5 à 21 milliards d'euros selon les options.

La probabilité que l'option de projet 1 ait un coût actualisé inférieur aux options 2, 3 et 4 est de 100 % sur 10 000 tirages.

7.1.2.2 Résultats dans un scénario KO, avec un taux d'actualisation intermédiaire

Le tableau ci-dessous résume les résultats du scénario KO avec le taux d'actualisation intermédiaire.

Tableau 7.1-7 Récapitulatif des coûts des options de projet, dans un scénario KO, taux d'actualisation intermédiaire

Scénario KO Actualisation intermédiaire	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	16 741 M€	-	-
Option 2	21 046 M€	4 305 M€	100 %
Option 3	24 271 M€	7 530 M€	100 %
Option 4	23 006 M€	6 265 M€	99 %

Dans le scénario KO et avec un taux d'actualisation intermédiaire, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option de projet 1.

Le différentiel moyen de coût global actualisé de l'option de projet 1 avec les options 2, 3, et 4 fait état de valeurs supérieures de l'ordre de 4 à 7 milliards d'euros selon les options.

La probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé inférieur à l'option 4 est de 99 % sur 10 000 tirages, et de 100 % face aux options 2 et 3.

7.1.2.3 Résultats dans un scénario KO, avec un taux d'actualisation élevé

Le tableau ci-après indique le résultat du calcul socioéconomique pour chaque option, dans un scénario KO, avec la borne haute du taux d'actualisation.

Tableau 7.1-8 *Récapitulatif des coûts des options de projet, en scénario KO, taux d'actualisation haut*

Scénario KO Actualisation haute	Coût global actualisé espéré de l'option	Différentiel moyen de coût global actualisé avec l'option de projet 1	Probabilité que l'option de projet 1 ait le coût global actualisé le plus faible, sur 10 000 tirages
Option de projet 1	11 646 M€		
Option 2	15 140 M€	3 494 M€	100 %
Option 3	17 194 M€	5 548 M€	100 %
Option 4	12 636 M€	990 M€	65 %

Dans le scénario KO et avec un taux d'actualisation haut, le coût global actualisé minimal est obtenu par l'option de projet 1.

Le différentiel moyen de coût global actualisé de l'option de projet 1 avec les options 2, 3, et 4 fait état de valeurs supérieures de l'ordre de près de 1 à 5 milliards d'euros selon les options.

La probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé inférieur à l'option 4 est de 65 % sur 10 000 tirages, et de 100 % face aux options 2 et 3.

7.1.2.4 Résultats dans un scénario KO avec valeur d'option

Comme pour le scénario OK, des valeurs d'options sont calculées en scénario KO, uniquement pour l'option 4, qui est l'option la plus sensible.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de l'option 4, sans et avec application des valeurs d'options et compare les coûts avec ceux de l'option de projet 1, pour le scénario KO. Les écarts s'atténuent de façon très minime.

Tableau 7.1-9 Option 4 sans et avec valeurs d'options dans un scénario KO et comparaison avec l'option de projet 1

Scénario KO	Option de projet 1	Option 4 sans valeur d'option	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4, sur 10 000 tirages	Option 4 avec valeur d'option	Valeur d'option de l'option 4	Probabilité que l'option de projet 1 ait un coût global actualisé plus faible que l'option 4 avec valeur d'option, sur 10 000 tirages
Taux d'actualisation bas	22 835 M€	43 825 M€	100 %	43 047 M€	778 M€	100 %
Taux d'actualisation intermédiaire	16 741 M€	23 006 M€	99 %	22 265 M€	363 M€	97 %
Taux d'actualisation haut	11 646 M€	12 636 M€	65 %	12 589 M€	47 M€	64 %

Ces résultats avec valeurs d'option dans le scénario KO confirment ceux obtenus pour l'effet des valeurs d'options dans un scénario OK. Cet effet est tout à fait négligeable. Aussi, dans la suite de ce chapitre, ce sont les chiffres sans valeur d'option, très proches et plus faciles à interpréter, qui seront retenus.

7.1.3 Date de réalisation du centre de stockage Cigéo

Les résultats bruts détaillés ci-dessus mettent en évidence que l'option de projet 1, c'est-à-dire la réalisation du centre de stockage Cigéo, est, dans la plupart des configurations du modèle, l'option la plus souhaitable (ces résultats sont discutés et mis en perspective dans le chapitre 7.2). Une autre question posée par l'évaluation socioéconomique concerne la date de réalisation du projet.

En d'autres termes, il convient de déterminer s'il est nécessaire de réaliser le centre de stockage Cigéo dès à présent, ou bien si une date ultérieure, disons décalée de 10 ans ou 20 ans, permettrait d'optimiser le coût global actualisé, sans remise en question de cette solution.

Un calcul simpliste consisterait simplement à translater le démarrage des coûts de Cigéo dans la chronique étudiée, et d'y ajouter des coûts d'entreposage supplémentaires pendant la durée souhaitée. Malgré ces coûts supplémentaires d'entreposage, il ressort en première analyse que le poids de l'actualisation est plus fort, c'est-à-dire que plus on décale la date de réalisation, plus le coût global actualisé est faible, ce qui reviendrait à dire que le décalage est favorable. Cependant, on observe que c'est le premier pas de temps qui fait décroître le plus fortement le coût global actualisé du centre de stockage Cigéo. Par exemple, en scénario OK, avec un taux d'actualisation haut, le coût global actualisé de Cigéo s'élève à 9,8 milliards d'euros si le projet est réalisé dès 2019. Ce coût s'abaisse de 2 milliards d'euros si le projet est décalé de 10 ans, et seulement d'un milliard d'euros supplémentaire si le projet est décalé de 20 ans. De la même façon, en scénario KO, avec un taux d'actualisation haut, le coût global actualisé s'élève à 11,6 milliards d'euros si le projet est réalisé dès 2019. Ce coût s'abaisse de 1,7 milliards d'euros si le projet est décalé de 10 ans, et seulement d'un milliard d'euros supplémentaire si le projet est décalé de 20 ans. Notons également qu'en scénario KO, avec un taux d'actualisation bas, le coût actualisé, si le projet est décalé de 20 ans (soit en 2039), est plus élevé que si le projet est réalisé en 2029 ou même qu'en 2019 (cf. chapitre 5.2.4.1 du présent document).

De plus, les décennies pendant lesquelles Cigéo n'est pas réalisé font courir le risque, à nouveau, de perdre le site de Meuse/Haute-Marne, de devoir chercher un nouveau site et de prendre le risque de ne pas le trouver à nouveau. De ce fait, il ne s'agit pas d'une simple translation de durée équivalente entre le démarrage et la mise en œuvre opérationnelle : un décalage de 10 ans au démarrage, en cas de perte de site reporte le démarrage d'une nouvelle mise en œuvre opérationnelle d'une cinquantaine d'année. Ce qui, du point de vue de l'actualisation, a des fortes incidences sur les coûts.

Par ailleurs, tout décalage de la mise en stockage des déchets radioactifs expose au risque d'accident en scénario KO.

Ainsi, si l'ensemble de ces paramètres était pris en compte (probabilité de perte de site, probabilité de ne pas trouver un nouveau site et probabilité d'accident intervenant sur la période de décalage), il apparaît intuitivement que les écarts de coûts entre une réalisation immédiate et une réalisation légèrement différée devraient être encore plus faibles, laissant penser que la date optimale de réalisation de Cigéo, si elle n'est pas en 2019, est tout de même relativement proche.

7.2 Discussion et mise en perspective des résultats de l'évaluation socioéconomique

7.2.1 Discussion concernant les résultats quantitatifs

Les résultats de cette évaluation socioéconomique font ressortir plusieurs enseignements.

Tout d'abord, la comparaison entre l'option de projet 1 et les options 2 et 3 met en évidence que quel que soit le scénario considéré (OK comme KO) et le taux d'actualisation envisagé (haut, intermédiaire ou bas), l'option de projet 1 domine les options 2 et 3. En effet, ces dernières ne résistent pas à un effet de « double astreinte » lié au fait de réaliser à la fois les premiers investissements du centre de stockage Cigéo et des investissements supplémentaires en R&D pour trouver une autre solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, alternative au stockage en couche géologique profonde.

En revanche, la comparaison entre l'option de projet 1 et l'option 4 débouche sur des conclusions plus nuancées, qui dépendent du scénario considéré et/ou du taux d'actualisation envisagé.

En scénario KO, l'option de projet 1 l'emporte également sur l'option 4, et ce, quel que soit le taux d'actualisation envisagé.

En effet, la perspective d'un scénario de société chaotique fait pencher la balance en faveur d'une mise en œuvre du centre de stockage Cigéo, plutôt qu'en faveur de l'option 4, le différentiel de valeur entre ces deux options étant compris entre environ 1 et 20 milliards d'euros selon le taux d'actualisation retenu.

En scénario OK, les résultats diffèrent selon le taux d'actualisation :

- avec un taux d'actualisation bas, dans 86 % des tirages, l'option de projet 1 est moins coûteuse. Elle constitue donc l'option à recommander ;
- avec un taux d'actualisation intermédiaire, la valeur espérée de l'option 4 est la plus faible. Notons toutefois que, selon les tirages, il existe une proportion élevée de cas (44 %) où l'option de projet 1 est moins onéreuse que l'option 4, et qu'en moyenne le différentiel de coût global actualisé entre ces deux options ne dépasse pas le demi-milliard d'euros ;
- enfin, avec un taux d'actualisation haut, la valeur espérée du coût de l'option 4 est plus faible (de moins d'un milliard d'euros), et ce dans une importante majorité de cas (65 %), ce qui pourrait conduire à recommander, si un tel choix d'actualisation était considéré, de prendre le risque de perdre le site de Meuse/Haute-Marne, d'interrompre la dynamique en faveur de la solution de

stockage géologique profond et du centre de stockage Cigéo et de se concentrer sur un investissement en R&D pour tenter de trouver une solution de gestion définitive alternative. En fonction des résultats de cette R&D, l'entreposage de longue durée renouvelé, qui n'offre pas ce caractère de mise en sécurité définitive, et nécessite une gestion active par l'homme, pourrait être la seule issue.

Cette situation conduit à pointer un résultat particulier de la modélisation de l'option 4. Cette dernière permet en principe de choisir différentes possibilités : Cigéo différé dans le temps, mise en œuvre d'une technologie prospective, entreposage de longue durée renouvelé, etc. Pourtant, les calculs indiquent qu'au sein de cette option, la branche 4.8 conduisant à de l'entreposage de longue durée renouvelé à partir de 2070 est souvent préférée, même dans le cas où les recherches aboutissent ou si le site de Meuse/Haute-Marne a pu être conservé. En effet, l'entreposage de longue durée renouvelé pour les déchets HA et MA-VL (branche 4.8) est la solution qui présente le coût actualisé le plus faible dans le scénario OK, dans la majorité des tirages, avec les taux haut et intermédiaire (cf. chapitre 5.5.2.1 du présent document), et ce alors même que la branche 4.8 contient des coûts de R&D jusqu'en 2070.

Cette observation s'applique également dans le scénario KO. Bien que l'option de projet 1 domine les options 2, 3 et 4, au sein de l'option 4, avec le taux d'actualisation bas, c'est la branche 4.8 qui est la moins onéreuse de toutes les branches (cf. chapitre 5.5.2.2 du présent document), alors même qu'elle inclut des coûts de R&D. Cela invite à considérer une variante de l'option 4, qui prévoirait, dès 2019, de ne s'en tenir qu'à des dépenses d'entreposage des déchets radioactifs, sans dépense de R&D⁷³.

Rappelons que les branches 4.5 et 4.8 et la variante de l'option 4 sont logiques du point de vue mathématique, mais qu'elles ne sont pas conformes à l'esprit de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (4), et qu'elles ne sont pas non plus vues comme acceptables dans aucun des pays passés en revue dans le présent rapport (cf. Annexe 1 à Annexe 13), eu égard aux risques qu'elles comportent pour les générations futures. Ainsi, l'option de projet 1 d'une part, et l'option 4 (ou sa variante) d'autre part, ne sont pas équivalentes en termes de service rendu : l'option de projet 1 répond à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, ce qui n'est pas le cas de l'option 4 lorsqu'elle conduit à de l'entreposage renouvelé *sine die* (ni celui de la variante de l'option 4).

Ces options ne sont donc pas pleinement comparables. Leur comparaison nécessiterait d'introduire, au-delà de la comparaison en termes de coûts, un bénéfice qui n'a pas été intégré dans le calcul et que l'on pourrait qualifier de « bénéfice assurantiel ». En effet, la modélisation de l'option de projet 1 ne valorise pas le fait que cette option permette de répondre à certaines préoccupations des générations actuelles, telles que la crainte d'une alternance de scénario avec le KO, le transfert du risque accidentel à des générations futures qui n'auront pas profité directement des avantages du nucléaire, ou toute autre volonté de répondre à une demande collective en ce domaine. Ce bénéfice assurantiel est discuté dans le chapitre ci-après.

7.2.2 Le bénéfice assurantiel du centre de stockage Cigéo

7.2.2.1 Bénéfice assurantiel et aversion collective au risque

La littérature en économie normative s'est interrogée de longue date sur le comportement collectif qu'il convient d'adopter face au risque. L'un de ses résultats centraux indique que si un risque est uniformément distribué entre des individus (soit pas sa nature, soit par un système public ou privé d'assurance), le degré d'aversion collective de ces derniers est inversement proportionnel à leur nombre, de sorte qu'il devient négligeable lorsque ce nombre est suffisamment grand⁷⁴. En d'autres termes,

⁷³ Cette variante inclut également des dépenses de GIP jusqu'en 2025, ainsi que des dépenses de maintien des compétences sur toute la durée d'actualisation.

⁷⁴ L'aversion pour le risque désigne les préférences d'un agent pour qui un projet risqué a une valeur moindre que l'espérance de ses bénéfices nets. L'écart entre la valeur du projet pour l'agent et l'espérance de ses bénéfices nets est la prime de risque que l'agent est disposé à payer pour ne pas être exposé au risque du projet. L'aversion collective pour le risque est ici un simple multiple de l'aversion individuelle. Cf. Arrow et Lind (1970 (90)).

lorsqu'un décideur public évalue un projet d'investissement dont le risque est d'une part décorrélé de la croissance, et d'autre part, faible une fois ramené au nombre d'agents, il peut se permettre d'être indifférent à ce risque et ne prendre en compte, dans le calcul socioéconomique précédant sa décision, que les coûts et avantages moyens du projet (cf. Baumstark et Gollier, 2014 (91)). Les coûts et avantages sont dits mutualisables⁷⁵.

L'une des avancées importantes des dernières années dans l'évaluation des investissements publics a consisté à tenir compte de situations où l'hypothèse d'indépendance n'est pas valide et où il y a donc lieu d'exprimer une aversion collective pour le risque (cf. rapport Gollier, 2011 (56)). Le taux d'actualisation intègre alors un coefficient d'aversion pour le risque⁷⁶.

Ce cadre méthodologique n'est cependant pas entièrement satisfaisant dans le cas de l'évaluation socioéconomique du centre de stockage Cigéo. La méthode ne reflète pas la spécificité du risque d'accident nucléaire grave que peut faire courir un incendie en entreposage, qui est l'exemple-type d'un risque catastrophique, dont les coûts ne sont pas mutualisables et sont suffisamment importants pour avoir des effets systémiques.

Des travaux récents ont étudié les conditions dans lesquelles les préférences collectives peuvent marquer une aversion pour la catastrophe, c'est-à-dire pour un événement engendrant des coûts très importants, notamment en termes de vies humaines⁷⁷, non mutualisables et susceptibles d'avoir des effets systémiques. Il ne relève pas du champ de cette évaluation socioéconomique de discuter de la portée normative de ces travaux, mais il faut cependant remarquer que de nombreuses études comportementales ont mis en évidence une forte aversion collective aux risques d'accident nucléaire (94) (95) (96) (97). Il semble dès lors justifié qu'un décideur public traite de façon particulière le risque d'accident nucléaire et qu'il considère cette aversion collective au risque.

L'évaluation socioéconomique modélise un tel accident, dans le cas du scénario KO (voir chapitre 6), en se limitant aux conséquences économiques (coût de prise en charge des réfugiés, coût de remédiation, coût d'image, coût économique direct). L'estimation ignore en revanche le coût sanitaire d'un tel accident (pertes de vies humaines, soins des blessés et des malades) qui, s'il est apparu trop incertain pour faire l'objet d'une quantification convaincante⁷⁸, aurait néanmoins de grandes chances de répondre à la définition d'une catastrophe.

Sans entrer dans la complexité des théories de l'aversion au risque catastrophique, notons que d'autres justifications peuvent être attachées à ce bénéfice assurantiel. Ce dernier peut aussi résulter d'une sensibilité plus grande aux risques de fatalité nucléaire, ou bien d'un souci éthique, ou de l'expression d'une volonté des populations. Cette valeur peut ainsi traduire un bénéfice psychologique de préférence pour une solution de gestion ne laissant pas planer de menace sur le futur.

Les paramètres correspondants, qui peuvent indifféremment être présentés comme un bénéfice assurantiel des solutions de mise en sécurité définitive ou comme un coût psychologique⁷⁹ attaché à l'entreposage *sine die*, pourraient être révélés, par exemple, par des études académiques de « disposition à payer », révélant le consentement à payer pour éviter de supporter ou de faire supporter aux générations futures un risque d'accident. De telles études n'existant pas, on peut simplement déterminer le bénéfice assurantiel pivot, celui pour lequel la hiérarchie des solutions change.

7.2.2.2 Estimation d'un bénéfice assurantiel pivot

Par simplicité dans la suite du raisonnement, l'option de projet 1, c'est-à-dire le centre de stockage Cigéo permettant la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sera appelée l'option « sûre ». *A contrario*, l'entreposage de longue durée renouvelé, ou entreposage *sine die*, qui expose au risque

⁷⁵ Par exemple, le risque de retard de livraison d'un projet ou le risque de surcoût sont des risques mutualisables.

⁷⁶ Voir à ce sujet l'Annexe 14 de ce rapport.

⁷⁷ Cf. notamment Bommier et Zuber (2008 (92)), ainsi que la revue complète proposée par Rheinberger et Treich (2017 (93)).

⁷⁸ La modélisation des risques sanitaires aurait nécessité l'utilisation de logiciels de modélisation avancés, tenant compte notamment de l'impact des phénomènes météorologiques sur la dispersion des rayonnements ionisants.

⁷⁹ Ce coût psychologique, pourrait être qualifié en anglais de « *shadow cost* ».

d'accident et ne permet pas de gérer définitivement les déchets radioactifs, sera appelé l'option « risquée ».

Le bénéfice assurantiel pivot est donc défini comme le bénéfice supplémentaire attribué à l'option sûre qui conduirait à préférer celle-ci à l'option risquée la moins chère. La situation exposant pleinement la collectivité à un risque de catastrophe serait la variante de l'option 4 qui prévoirait, dès 2019, de s'en tenir à des dépenses d'entreposage des déchets radioactifs, sans dépense de R&D. Cette variante de l'option 4 qui, comme on l'a dit, apparaît aujourd'hui comme inacceptable du point de vue sociétal, a l'avantage comptable, par rapport aux branches 4.5 et 4.8 de l'option 4, de ne pas être « alourdie » par des dépenses de R&D jusqu'en 2070.

Si la collectivité valorise son aversion pour le risque, ou son souhait de ne pas laisser la charge des déchets radioactifs aux générations futures, à au moins l'écart entre l'option de projet 1 et la variante de l'option 4, alors c'est l'option de projet 1 qui est choisie, et non la variante de l'option 4 qui est moins onéreuse. Ce différentiel permet d'estimer le bénéfice assurantiel pivot. Dit autrement, il s'agit de la prime additionnelle qu'il est nécessaire de verser pour faire basculer la préférence d'une option risquée (variante de l'option 4) vers une option sûre, comportant une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs (option de projet 1 et certaines branches de l'option 4), quand bien même cette dernière apparaîtrait, en première analyse, plus coûteuse.

D'une certaine façon, le choix en 2006 de prendre le chemin de la réalisation du centre de stockage Cigéo, plutôt que de poursuivre continuellement l'entreposage des déchets radioactifs, semble indiquer que le décideur public de l'époque a attribué à la solution de mise en sécurité définitive un tel bénéfice assurantiel.

Dans ce raisonnement, les valeurs de l'option de projet 1 et de la variante de l'option 4 sont déterminées en termes d'espérance, c'est-à-dire qu'elles correspondent à la somme des valeurs en scénario OK et en scénario KO pondérées par les probabilités de ces *scenarii*. Ne disposant pas de méthode pour estimer de façon raisonnablement fiable la probabilité des *scenarii*, nous ne pouvons que simuler, à titre indicatif, la valeur du bénéfice assurantiel pivot de l'option de projet 1 pour différentes probabilités de survenue du scénario KO.

Le tableau ci-dessous présente ainsi, pour chacun des trois profils de taux d'actualisation, les coûts de l'option de projet 1 et de la variante de l'option 4, dans les *scenarii* OK et KO, ainsi que l'écart entre l'espérance de leurs coûts (c'est-à-dire le bénéfice assurantiel pivot de l'option de projet 1), si l'on attribue au scénario KO, à titre d'illustration, une probabilité d'occurrence de 0 ; de 0,1 ; de 0,25 ou de 1.

Tableau 7.2-1 Estimation du bénéfice assurantiel du centre de stockage Cigéo, en fonction de la probabilité de tomber dans un scénario KO

Taux d'actualisation	OK		KO		Bénéfice assurantiel de l'option de projet 1			
	Option de projet 1	Variante de l'option 4 (ELD sans R&D)	Option de projet 1	Variante de l'option 4 (ELD sans R&D)	Probabilité (KO)=0	Probabilité (KO)=0,1	Probabilité (KO)=0,25	Probabilité (KO)=1
Taux d'actualisation bas	14 482 M€	8 448 M€	22 835 M€	58 310 M€	6 034 M€	1 882 M€	-4 344 M€	-35 475 M€
Taux d'actualisation intermédiaire	12 544 M€	4 026 M€	16 741 M€	14 221 M€	8 518 M€	7 918 M€	7 019 M€	2 520 M€
Taux d'actualisation haut	9 836 M€	2 303 M€	11 646 M€	4 473 M€	7 532 M€	7 496 M€	7 442 M€	7 172 M€

ELD : entreposage de longue durée renouvelé

Ce tableau fait apparaître dans les colonnes n° 2 à 5, les coûts globaux actualisés de l'option de projet 1 et de la variante de l'option 4 (entreposage de longue durée renouvelé, décidé dès 2019 et sans R&D) selon le taux d'actualisation et le scénario considérés.

Les valeurs des colonnes n° 6 à 9 s'interprètent comme le bénéfice assurantiel à mettre au crédit de l'option de projet 1 en fonction de la probabilité de survenue d'un scénario KO.

Ainsi, la colonne n° 6 représente l'écart de coûts entre ces deux options en scénario OK, lorsque la probabilité de survenue du scénario KO est nulle. De l'autre côté du spectre, la dernière colonne (colonne n° 9) représente l'écart de coûts entre ces deux options en scénario KO, c'est-à-dire le bénéfice assurantiel de l'option de projet 1 si la probabilité de survenue du scénario KO est égale à 1. Entre les deux, les colonnes n° 7 et 8, mesurent le bénéfice assurantiel du projet Cigéo, pour un décideur public qui estimerait que le scénario KO à 10 % ou 25 % de chances de se produire.

On observe que le bénéfice assurantiel pivot du centre de stockage Cigéo varie fortement en fonction de la probabilité attribuée au scénario KO lorsque le taux d'actualisation bas est retenu. La valeur négative dans les colonnes n° 8 et 9 indique que, pour un taux d'actualisation bas et une probabilité élevée de survenue du scénario KO, l'option de projet 1 présente des coûts espérés inférieurs à ceux de l'entreposage de longue durée sans R&D, de sorte que, en choisissant ce dernier, le décideur public révélerait une préférence singulière pour les solutions les plus risquées. Avec ce taux d'actualisation bas, le bénéfice assurantiel pivot de Cigéo s'annule dès que la probabilité du scénario KO dépasse 14,4 %.

Ainsi, pour un taux d'actualisation bas, plus l'espérance de pertes liées à un accident est élevée, moins elle rend nécessaire le versement d'une prime additionnelle pour que l'option sûre (l'option de projet 1) soit préférée à l'option risquée.

Pour le taux d'actualisation intermédiaire, le versement d'une prime additionnelle est nécessaire et celle-ci décroît en fonction de l'augmentation de la probabilité de survenue du scénario KO. *A contrario*, pour le taux d'actualisation haut, la prime additionnelle est pratiquement constante, quelle que soit la probabilité de survenue du scénario KO. Son montant est légèrement inférieur au prime maximum observé dans le cas du taux d'actualisation intermédiaire.

Au global, le bénéfice assurantiel pivot de Cigéo varie, en fonction du taux d'actualisation, entre 1,9 et 7,9 milliards d'euros si la probabilité de survenue du scénario KO est de 10 %, et entre -4,3 et 7,4 milliards d'euros si elle est de 25 %. Rapporté à la population française, un bénéfice assurantiel pivot de 7,9 milliards d'euros représente une somme de 118 euros par habitant, avec un taux d'actualisation intermédiaire et une probabilité de survenue du scénario KO de 10 % : il s'agit donc ce que chaque Français, devrait être disposé à payer (en un seul versement) pour se prémunir dès 2019 contre le risque d'accident grave qui caractérise l'entreposage de longue durée sans recherche en cas de dérive sociale et répondre à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs. Rappelons qu'il n'existe pas d'étude de disposition à payer pour se prémunir de ce risque. Les valeurs estimées ne sont représentatives que d'un pivot défini comme le bénéfice supplémentaire attribué à l'option sûre qui conduirait à préférer celle-ci à l'option risquée la moins chère. Une disposition à payer supérieure à 118 euros (pour une probabilité de survenue du scénario KO de 10 %) conduit alors le choix vers la réalisation du centre de stockage Cigéo.

Concernant le choix législatif réalisé en 2006 de mise en sécurité définitive par la voie du stockage géologique profond, on en déduit rétroactivement que le décideur public de l'époque intégrait une disposition à payer suffisante pour se prémunir du risque.

Dès lors que ce raisonnement assurantiel est introduit pour rendre comparables une option sûre et une option risquée, il convient de répliquer ce raisonnement au sein de l'option qui mêle des branches sûres et des branches risquées (comme c'est le cas de l'option 4). Dans l'option 4, la plupart des branches conduit à une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs, soit *via* une technologie de stockage en couche géologique profonde, soit *via* une technologie prospective, décidée en 2070 ou au plus tard en 2100. Cependant, les branches 4.5 et 4.8 conduisent à de l'entreposage de longue durée renouvelé, soit uniquement pour les déchets MA-VL, soit pour les HA et les MA-VL. Or, comme mis en évidence dans le chapitre 7.2.1, au sein de l'option 4, c'est la branche 4.8 qui est la plupart du temps la moins onéreuse ; *a priori* c'est donc celle-ci qui serait choisie par un décideur public qui arbitre en fonction des coûts, et ce même si une solution de mise en sécurité définitive est maintenue ou trouvée.

Par exemple, la branche 4.1. (a, b, c, d) modélise la situation où la R&D est fructueuse et le site Meuse/Haute-Marne est conservé. Tout est donc possible pour gérer de façon définitive les déchets radioactifs. Dans le scénario OK, avec un taux d'actualisation haut, le coût de stockage des déchets HA et MA-VL dans Cigéo (branche 4.1.a) décidé en 2070 après 50 années de R&D s'élève à 9,9 milliards d'euros. Pourtant, même si cette branche 4.1.a est disponible, le décideur public qui arbitre seulement en fonction des coûts va choisir la branche 4.8, c'est-à-dire de l'entreposage de longue durée renouvelé, car d'une part cette branche est également « disponible » et d'autre part son coût est moindre (9 milliards d'euros) – cf. chapitre 5.5.2.1 du présent document.

Cette conclusion n'est plus exacte si le décideur public intègre une valeur assurantienne suffisamment élevée, valorisant les solutions dites « sûres » par rapport aux solutions dites « risquées ». Auquel cas, il convient, au sein de l'option 4, d'introduire le raisonnement assurantiel pivot, à chaque fois qu'une branche sûre est en concurrence avec une branche risquée.

Les valeurs pivot du bénéfice assurantiel en chacun des points de décision de l'option 4 dépendent, comme dans le calcul du tableau 7.2-1, des coûts espérés des solutions alternatives, en fonction de la probabilité attribuée à la survenue du scénario KO, à ces dates. Le calcul, détaillé dans l'annexe 20, montre que la valeur des bénéfices assantiels pivot propres à l'option 4, conduisant à préférer les branches sûres en 2070 ou 2100 serait du même ordre (et le plus souvent inférieure) à la valeur pivot calculée précédemment (différentiel entre l'option de projet 1 et la variante de l'option 4) et ce quels que soient la probabilité du scénario KO et le taux d'actualisation retenus.

Un décideur public qui s'engagerait à présent dans l'option 4, doit tabler sur une disposition à payer pour une solution sûre de l'ordre de 8 milliards en 2070 ou en 2100, pour que si une branche sûre est disponible, celle-ci soit effectivement choisie en lieu et place de l'entreposage *sine die*.

Par ailleurs, si le décideur actuel estime qu'une telle disposition à payer est et sera accordée aux solutions sûres, alors **non seulement les branches sûres de l'option 4 sont plus favorables que les branches risquées, mais en plus l'option de projet 1 devient moins onéreuse que l'option 4, et ce quel que soit le taux d'actualisation retenu et pour toutes les probabilités de survenue du scénario KO.**

Dès lors que cette disposition à payer est effectivement supérieure à la valeur assurantienne pivot, le choix de réaliser le centre de stockage Cigéo est le choix le plus favorable, quelles que soient les configurations du modèle.

Si au contraire, la disposition à payer est inférieure à la valeur assurantienne pivot, alors le centre de stockage Cigéo est la décision la plus favorable dans 4 cas sur 6, c'est-à-dire en scénario KO, quel que soit le taux d'actualisation, ou en scénario OK, avec un taux d'actualisation bas.

7.2.3 Synthèse des résultats de l'évaluation socioéconomique et de sa mise en perspective

L'**approche quantitative** de cette évaluation socioéconomique prend en compte les coûts de mise en place des options et les coûts liés à un éventuel accident en entreposage. Elle parvient à mettre en évidence la supériorité du centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi (option de projet 1) dans diverses configurations, répondant ainsi à un certain nombre de questions sociétales :

- L'évaluation socioéconomique montre que l'option 1 est préférable aux options 2 et 3, modélisant la poursuite d'investissements dans de la R&D en vue de trouver une technologie prospective alternative au stockage géologique profond, combinés à la construction initiale et la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo, visant à s'assurer que cette technologie et le site afférent soient toujours disponibles au cas où la R&D ne serait pas fructueuse. Les résultats des options 2 et 3 sont inférieurs à ceux de l'option de projet 1, quels que soient le scénario et le taux d'actualisation considérés.
- L'évaluation socioéconomique montre également que face à la survenue d'une dégradation du contexte sociétal, modélisée par le scénario KO, l'option de projet 1 est meilleure que les options 2, 3 et 4, et ce, quel que soit le taux d'actualisation.
- Enfin, l'évaluation socioéconomique met en évidence que la préoccupation forte pour les générations futures, modélisée *via* le taux d'actualisation bas conduit également à rendre l'option de projet 1 meilleure que les options 2, 3 et 4, et ce, quel que soit le scénario.

En revanche, l'approche quantitative de cette évaluation socioéconomique montre aussi que l'option 4, dont certaines branches conduisent à de l'entreposage de longue durée renouvelé, apparaît, quant à elle, moins onéreuse que l'option de projet 1 dans le contexte particulier d'un scénario OK avec un taux d'actualisation haut ou intermédiaire.

En complément, l'**approche qualitative** de la modélisation indique que l'option de projet 1 (centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi) est tout le temps plus favorable si le décideur public estime qu'il existe un bénéfice assurantiel suffisant attaché aux solutions de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs. Ce bénéfice assurantiel constitue, en miroir, un coût supplémentaire attaché à l'entreposage de longue durée renouvelé. Dit autrement, mettre définitivement les déchets radioactifs en sécurité peut être vu comme une assurance en cas de survenue d'un scénario KO, ou encore comme un allègement psychologique lié au fait de ne pas laisser aux générations futures le poids de la gestion des déchets radioactifs et enfin, de ne pas leur transférer de risque accidentel.

Un bénéfice assurantiel pivot, non modélisé directement, a été déduit en estimant une prime additionnelle pivot à mettre au crédit de l'option jugée sûre (option de projet 1 et certaines branches de l'option 4), permettant à l'option sûre d'être plus favorable. Si le décideur public actuel, estime que les sociétés du futur auront, comme hier et aujourd'hui, une préférence pour les solutions de gestion définitive ou une aversion pour le risque, alors il convient d'affecter une prime assurantielle aux branches et options permettant la mise en sécurité définitive. Si la valeur que représente cette assurance est au moins égale au bénéfice assurantiel pivot, alors l'option de projet 1 est effectivement préférable dans tous les cas de figure (quel que soit le taux d'actualisation retenu et quelle que soit la probabilité de tomber dans un scénario KO).

L'ensemble de ces conclusions, ici très résumées, doit être manié avec les précautions qui s'imposent, compte tenu des hypothèses posées tout au long de l'évaluation socioéconomique.

► EN D'AUTRES TERMES :

- Cela revient à considérer que dans une société persuadée de sa stabilité perpétuelle (c'est-à-dire persuadée de la permanence d'un scénario OK), et priorisant l'intérêt de ses contemporains (c'est-à-dire écartant un taux d'actualisation faible) et qui, enfin, arbitre principalement en fonction des coûts (c'est-à-dire qui n'attribue pas de valeur suffisante au bénéfice assurantiel d'une solution de mise en sécurité définitive), le choix rationnel, mis en évidence par le calcul socioéconomique, consiste à renouveler continuellement l'entreposage des déchets radioactifs, transformant de facto une solution aujourd'hui considérée comme temporaire en une solution de long terme.
- *A contrario*, dès lors que l'éventualité d'une défaillance sociétale à long terme est considérée (c'est-à-dire que la survenue d'un scénario KO est prise en compte), ou que l'intérêt porté aux générations futures est suffisamment élevé (c'est-à-dire qu'un taux d'actualisation bas est retenu), ou que, à défaut, une valeur suffisante est accordée au bénéfice assurantiel lié à la mise en sécurité définitive, alors l'option de projet 1 de réalisation du centre de stockage Cigéo constitue la solution préconisée par la présente évaluation socioéconomique.

7.3 Observations finales et recommandations sur l'évaluation socioéconomique appliquée à la gestion des déchets radioactifs

Au terme de la présentation des résultats, il importe de souligner à nouveau que l'évaluation socioéconomique aussi complète d'un projet de gestion des déchets radioactifs est une première du genre. Elle est en ce sens exploratoire et invite, notamment, à la poursuite de nombreux travaux académiques en économie.

Des repères préalables ont été posés, au chapitre 1 (section 1.4), concernant les différents types d'incertitudes relatives à la présente évaluation socioéconomique. Au-delà de ces observations, d'autres points méritent d'être discutés.

- Tout d'abord, certains résultats de l'évaluation peuvent être sous-estimés pour les raisons suivantes :
 - ✓ Les tirages portant sur les coûts des différentes options de projet ont été effectués sur des distributions de risque identiques ; en d'autres termes, nous supposons que si le coût du génie civil, par exemple, augmente dans l'option de projet 1, il augmente également en option de projet 4, et ce, quelle que soit l'année. Cette hypothèse a tendance à réduire la plage de chevauchement des résultats des options 1 et 4.
 - ✓ Tel que développé dans l'encadré figurant dans l'annexe 14 au chapitre 14.2, certaines hypothèses simplificatrices ont été prises sur l'estimation du taux d'actualisation. Notamment un terme correcteur, qui aurait tendance à réduire le taux d'actualisation, aurait pu être introduit et ne l'a pas été, par soucis de simplification. Cela aurait réduit les avantages de l'option 4 et notamment des branches de l'entreposage de longue durée renouvelé.
 - ✓ Les dépenses de R&D ont été considérées constantes : c'est une hypothèse simplificatrice, car ces efforts de R&D sont corrélés à certaines variables et pourraient évoluer dans le temps en fonction du contexte.
 - ✓ Le coût de densification des déchets MA-VL ne tient pas compte des différentes spécificités de ces déchets.
 - ✓ La probabilité d'accident en scénario OK a été considérée comme négligeable au vu des autres ordres de grandeur en jeu. En réalité, cette probabilité est très faible compte tenu du respect de la démarche de sûreté.
 - ✓ L'accident a été envisagé et modélisé en scénario KO et uniquement pour les déchets MA-VL ; par rapport à une situation accidentelle concernant les déchets HA, il s'agit d'une sous-estimation.
 - ✓ Le coût sanitaire d'un accident lié à la gestion des déchets radioactifs n'a pas été pris en compte, faute d'estimations suffisamment robustes mobilisables dans le temps imparti pour la production de cette évaluation socioéconomique.
- A l'inverse, la problématique du coût du projet Cigéo constitue un sujet d'attention spécifique :
 - ✓ En effet, il est courant que les très grands projets voient leurs coûts s'écarter sensiblement des premières estimations. Le coût utilisé dans les calculs correspond au coût de 25 milliards d'euros défini dans l'arrêté du 15 janvier 2016, par la Ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Sans valorisation des risques et des opportunités, des estimations préalables avançaient une fourchette de coût brut entre 20 et 35 milliards d'euros.
 - ✓ Néanmoins, les estimations de coûts de l'évaluation socioéconomique ne sauraient se substituer aux mises à jour réglementaires définies dans l'article 2 de l'arrêté du 15 janvier 2016 : « *Le coût fixé à l'article 1^{er} est mis à jour régulièrement et a minima aux étapes clés du développement du projet (autorisation de création, mise en service, fin de la « phase industrielle pilote », réexamens de sûreté), conformément à l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire.* »

- ✓ Dès lors, ce risque sur les montants est pris en compte par la méthode probabiliste des simulations de Monte-Carlo proposée par la présente évaluation socioéconomique, qui permet de définir des distributions de coûts afin de traduire des incertitudes sur ces montants, dans l'attente des mises à jour réglementaires précitées.
- ✓ On notera que l'approche concernant les coûts est conservatrice, car le niveau de maturité du projet global Cigéo et des évaluations de coûts associés sont bien supérieurs au niveau de maturité des alternatives pour lesquelles les risques de surcoûts sont beaucoup plus importants.
- ✓ Par ailleurs, il est considéré que les différentes options présentées ci-avant ne sont mises en œuvre que si leur sûreté est validée (ce qui est du ressort des autorités compétentes). Le bénéfice du centre de stockage Cigéo apparaît au travers de son caractère passif après fermeture avec une sûreté maintenue quel que soit le scénario d'évolution de la société (y compris dans le scénario KO).
- ✓ L'estimation du bénéfice du centre de stockage Cigéo, qui permet de prémunir la société des conséquences d'un éventuel accident en entreposage après la fermeture, repose sur l'analyse que ce projet ne fait pas courir d'autres risques majeurs. Cette analyse se fonde sur les dossiers d'options de sûreté qu'il ne nous appartient pas de questionner, car cette compétence est hors du champ de l'économiste et que ces dossiers d'options de sûreté sont approuvés par les autorités compétentes.
- Enfin, soulignons également que certaines des options, imaginées dans le cadre d'une comparaison avec l'option de projet 1 de réalisation du centre de stockage Cigéo, peuvent être délicates à envisager, dès lors qu'elles diffèrent des décisions législatives construites au fur et à mesure des avancées des programmes de recherche. La définition d'options autres que le centre de stockage Cigéo ne préjuge donc pas de la possibilité de les mettre en œuvre.

Au-delà des solutions qui ont été apportées, en toute transparence, dans le cadre de la présente évaluation, des voies de développements additionnels semblent intéressantes à signaler, afin de susciter des efforts de recherche académique :

- La modélisation quantitative du scénario KO est inédite et mériterait d'être approfondie par d'autres experts. La modélisation proposée se base sur des hypothèses quantifiées issues d'une littérature plutôt qualitative ; une avancée procéderait également (via des méthodes de programmation dynamique) à modéliser l'alternance de périodes de stabilité et d'instabilité, plus conforme à l'histoire qu'une différenciation de ces états en deux *scenarii*.
- La modélisation des risques a été faite schématiquement, sans considération d'interdépendance et sans disposer de banques de données du secteur du nucléaire. Il y aurait un intérêt à constituer une telle banque de données pour des raffinements ultérieurs.
- Une discussion sur le taux d'actualisation a été introduite et prise en compte à toutes les étapes de cette étude. Elle a mis en évidence le besoin de repères méthodologiques qui vont au-delà des horizons temporels habituellement considérés. Bien que la valeur de référence du taux d'actualisation socioéconomique soit régulièrement réinterrogée par les experts de ce sujet, elle ne l'est jamais à cet horizon (ni en France, ni à l'international), dans la mesure où les projets usuellement considérés n'impliquent pas des projections aussi lointaines.
- Un bénéfice assurantiel pivot a été déduit. Il nécessiterait d'être confronté avec une disposition à payer pour se prémunir contre le risque de catastrophe collective, un champ d'investigation et de recherche reste à ouvrir sur ce thème, à la frontière entre économie normative et économie comportementale.

L'évaluation socioéconomique du centre de stockage Cigéo invite donc instamment à ouvrir des pistes d'approfondissements supplémentaires dans tous ces domaines.

ANNEXES



Annexe 1 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Allemagne

1.1 Contexte national

En 2018, l'Allemagne comptait près de 83 millions d'habitants avec un PIB d'environ 3 300 milliards d'euros.

1.1.1 Politique énergétique

Depuis le début des années 2000, l'Allemagne s'est engagée dans une politique de sortie du nucléaire qui s'est accentuée à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi en 2011. Dès lors, 7 des plus anciens réacteurs électronucléaires ont été arrêtés et la décision a été prise de fermer progressivement l'ensemble des derniers réacteurs d'ici 2022. Avant 2011, l'Allemagne détenait 17 réacteurs en activité et produisait environ 25 % de son électricité *via* l'atome. Aujourd'hui, 7 réacteurs restent en activité, ramenant la part du nucléaire dans le mix énergétique à environ 12 %.

► NOTE IMPORTANTE

À partir de 2005, l'Allemagne a interdit tout retraitement du combustible usé (auparavant réalisé dans les installations de La Hague en France et de Sellafield au Royaume-Uni). Les derniers déchets vitrifiés de haute activité issus de cette pratique doivent être retournés en Allemagne d'ici 2022.

1.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En 2016, l'Allemagne a adopté une loi visant à réorganiser la gestion des déchets radioactifs qui précise la responsabilité des différents acteurs dans ce domaine (98) (99).

L'office fédéral en charge de la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, le **Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit** (BfE), a été établi en 2014. Il s'agit de l'autorité compétente qui élabore la réglementation et en contrôle l'application pour les installations de stockage et le transport des déchets radioactifs. Le BfE évalue le processus de sélection d'un site qui abritera l'installation de stockage géologique des déchets de haute activité (ou déchets exothermiques) et des combustibles usés ainsi que la participation du public au processus (la décision finale sera prise par le Parlement fédéral).

La compagnie fédérale pour le stockage des déchets radioactifs, la **Bundesgesellschaft für Endlagerung** (BGE), a été créée en 2017 et met en œuvre la politique du gouvernement fédéral en matière de stockage géologique des déchets radioactifs et du combustible irradié. Le champ de responsabilité de la BGE couvre :

- les installations de stockage existante et les projets de stockage pour les déchets de faible et de moyenne activité (ou déchets non ou très faiblement exothermique) ;
- la mise en place du processus de sélection d'un site pour abriter l'installation de stockage géologique des déchets de haute activité (ou déchets exothermiques) et des combustibles usés ;
- la conception, la construction et le fonctionnement de l'installation de stockage géologique des déchets de haute activité (ou déchets exothermiques) et des combustibles usés.

La **Gesellschaft für Zwischenlagerung** (BGZ) est une organisation gouvernementale nouvellement créée qui assurera en totalité à compter de 2020 et en remplacement de GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH) la gestion des installations d'entreposage des déchets radioactifs.

La Commission sur la gestion des déchets nucléaires (ESK) conseille le Ministère fédéral en charge de l'environnement (BMU) sur les questions techniques relatives à la gestion des déchets nucléaires.

1.2 Sources, types et quantités de déchets

Pour l'ensemble de ses déchets radioactifs, l'Allemagne a fait le choix d'opter pour une seule solution de stockage à savoir le stockage géologique. Pour cela, la totalité des déchets radioactifs ont été classés en deux catégories, sans tenir compte de la période radioactive. Ces deux catégories sont :

- les déchets à pouvoir exothermique négligeable (équivalents des déchets de faible et moyenne activité) ;
- les déchets à haut pouvoir exothermique (équivalents des déchets de haute activité ainsi que d'une partie des déchets de moyenne activité).

Les déchets radioactifs dits exothermiques comprennent des concentrés de produits de fission, des coques et embouts ainsi que les crayons combustibles eux-mêmes lorsqu'ils ne sont pas stockés directement avec les déchets radioactifs.

Les quantités de déchets radioactifs conditionnés (prêts à être entreposés et/ou stockés) ont été calculées jusqu'en 2080 sur la base d'enquêtes réalisées dans le cadre de la planification des opérations de stockage. Ces prévisions calculées jusqu'à la fin de 2080 donnent les volumes suivants : 300 000 m³ de déchets radioactifs conditionnés à pouvoir exothermique négligeable (déchets FMA) et 28 000 m³ de déchets conditionnés à haut pouvoir exothermique (déchets HA). Ces chiffres se fondent sur une durée de vie moyenne des réacteurs évaluée à 32 années.

1.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

1.3.1 Solutions de gestion actuelle

La loi de sortie du nucléaire a imposé aux exploitants de prévoir des installations d'entreposage des déchets radioactifs et des combustibles usés à proximité des centrales nucléaires. Jusqu'en 2017, les exploitants des centrales, des réacteurs de recherche et des installations du cycle du combustible étaient responsables de l'entreposage du combustible usé et du conditionnement et de l'entreposage de tous les déchets jusqu'à leur stockage final. Une filiale commune aux exploitants, GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service), a réalisé pendant près d'une vingtaine d'années l'entreposage des déchets dans les installations des centres d'Ahaus et de Gorleben. Actuellement, les déchets produits sont principalement entreposés sur ou à proximité des centrales nucléaires. Pour les déchets de faible et moyenne activité non exothermique, les installations de stockage suivantes sont gérées par le BGE :

- **Konrad** : une ancienne mine de fer qui est convertie depuis 2007 en installation de stockage. Les premiers colis y seront stockés au plus tôt en 2027 ;
- **Asse** : une ancienne mine de sel où les déchets stockés doivent être à présent retirés en raison d'un défaut de sûreté ;
- **Morsleben** : une ancienne installation de stockage dans une mine de sel.

De son côté, la BGZ a repris depuis 2017 le fonctionnement des installations d'entreposage à sec centralisées à Ahaus et Gorleben et dédiées au stockage du combustible usé et des déchets de haute activité. Depuis début 2019, le BGZ gère également les 12 installations d'entreposage à sec de combustibles usés et de déchets de haute activité localisées sur les sites de centrales nucléaires.

1.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

Depuis 1979, des recherches pour un stockage géologique des déchets exothermiques et des combustibles usés ont été réalisées à Gorleben, au niveau d'un dôme de sel. Jusqu'en 2012, la construction d'une installation de stockage était planifiée sur ce site. En 2012, il a été décidé de débiter un nouveau processus de sélection d'un site après l'interruption de toute exploration dans le dôme de sel de Gorleben, le choix d'une roche hôte de type saline étant fortement remis en cause, ainsi qu'une

très forte opposition locale. Si Gorleben reste une option, d'autres sites potentiels sont considérés et la nature de la roche hôte (sel, argile ou granite) n'a pas encore été déterminée, tout comme les modalités de conditionnement des déchets. La loi StandAG de 2013 mise à jour en 2017 (100) porte sur le processus de sélection d'un site (sous l'égide de BGE et de BfE) pour le stockage géologique des déchets exothermiques et du combustible usé. Parmi les critères de sélection on relève les éléments suivants :

- la localisation la plus sûre doit être utilisée ;
- le stockage doit être sûr pour au moins 1 million d'années ;
- la participation du public est obligatoire ;
- le retrait des colis doit être possible pendant 500 ans ;
- la réversibilité des décisions doit être possible ;
- le processus de sélection d'un site doit comporter plusieurs étapes :
 - ✓ sélection des régions d'accueil ;
 - ✓ exploration de surface ;
 - ✓ exploration souterraine ;
 - ✓ proposition d'un site et décision (d'ici à 2031).

À ce jour, bien que le site ne soit pas encore trouvé, le fonctionnement du stockage géologique est prévu pour débuter aux alentours de 2050.

1.3.3 Alternatives envisagées

Un article publié en 2017 dans la revue *Geosciences* (101) porte sur l'analyse du stockage des déchets exothermique (HA) en utilisant la technique de forage profond en Allemagne. Le document précise que la Commission sur la gestion des déchets nucléaires allemande (ESK) a demandé la réalisation d'une étude portant sur cette technologie qui est présentée comme l'unique solution de stockage alternative méritant d'être évaluée : « *Disposal in geological formations using mining technology with retrievability and recoverability is favoured. It is also noted that disposal using boreholes in geological formations is the only realistic alternative option over transmutation or long-term interim storage* ». L'option de forage profond présenterait potentiellement plusieurs avantages : sûreté renforcée notamment sur le long terme, fonctionnement *a priori* simplifié et raccourci de l'installation de stockage, possible réduction des coûts de stockage. L'article précise que des travaux de R&D sont nécessaires pour réaliser des forages d'un diamètre de 0,75 mètres à 3 500 mètres de profondeur, mais que les experts sont confiants sur ce point. La possibilité de récupérer des colis sur 500 ans, si ce critère est maintenu dans le processus de sélection, doit également faire l'objet de recherche.

1.4 Modalités de financement

Lors de la publication de la loi StandAG en 2013 (100), le Ministère fédéral de l'Environnement (BMU) annonça que les exploitants devraient financer à hauteur de 2 milliards d'euros la recherche d'un nouveau site pour le stockage des déchets exothermiques, soit la somme qu'ils avaient déjà investie dans le site de Gorleben (1,6 milliards d'euros). Le site accueillera 10 500 tonnes de combustibles usés, 300 colis de déchets issus du retraitement du combustible usé et 500 colis de combustibles usés utilisés à des fins de recherche.

En décembre 2016, le Parlement allemand vota une résolution portant sur la création d'un fonds de 23,6 milliards d'euros géré par l'État pour le financement de l'entreposage et du stockage de l'ensemble du combustible usé et des déchets nucléaires allemands. Les quatre exploitants de centrales nucléaires ont entièrement financé le fonds : 16,7 milliards d'euros pour RWE et EON ; 1,75 milliards d'euros pour Vattenfall et 4,7 milliards d'euros pour EnBW. Le fonds aurait été abondé à hauteur de 24,7 milliards d'euros (août 2017). Les fonds doivent croître à 100 milliards d'euros d'ici 2100.

Annexe 2 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Belgique

2.1 Contexte national

En 2018, la Belgique comptait 11 millions d'habitants avec un PIB d'environ 460 milliards d'euros.

2.1.1 Politique énergétique

C'est en 1974 que la Belgique se lance dans l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. À ce jour, la Belgique dispose de 7 réacteurs nucléaires installés sur deux sites, Tihange et Doel, et qui fournissent environ 50 % de l'électricité produite dans le pays. En 2003, une loi de sortie progressive de l'énergie nucléaire prévoit une durée de fonctionnement des centrales belges de 40 ans environ. En 2012, le gouvernement a cependant décidé de prolonger le fonctionnement des centrales de 10 années supplémentaires, soit, jusqu'en 2025 environ.

► NOTE IMPORTANTE

Le retraitement du combustible usé a été réalisé sur le site de la Hague jusqu'au début des années 2000. L'ensemble des déchets vitrifiés issus du retraitement sont retournés en Belgique depuis 2007.

2.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Belgique, les acteurs de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (102) (103) :

- **L'autorité de sûreté nucléaire**, portant le nom d'**Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN)**, a été créée en 1994. Sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur, l'AFCN a pour mission de veiller à la protection de la population et de l'environnement vis-à-vis des rayonnements ionisants. Cette autorité assure la réglementation nucléaire et instruit les dossiers de demande d'autorisation soumis par les installations nucléaires. À noter que l'AFCN possède un conseil scientifique indépendant, nommé par le Gouvernement, qui fournit un avis préalable aux autorisations de création ou de renouvellement des installations nucléaires. Depuis 2008, la filiale de l'AFCN, **Bel V**, regroupe l'ensemble des activités réglementaires et s'occupe donc des activités de contrôles dans les installations nucléaires.
- **Le gestionnaire, Ondraf-Niras** (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles), est une entreprise publique créée en 1980 et placée sous la tutelle des ministères de l'Énergie et de l'Économie. L'Ondraf est en charge de la gestion de tous les déchets radioactifs présents sur le territoire belge, allant de leur transport, traitement, conditionnement et entreposage à la recherche de solutions de stockage à long terme. En pratique, c'est **Belgoprocess**, filiale de l'Ondraf, qui se charge du traitement et du conditionnement des déchets radioactifs issus des centrales nucléaires, du secteur industriel, des activités médicales ou de recherche. Belgoprocess exploite deux centres d'entreposages temporaires situés sur les communes de Dessel et Mol où elle stocke les déchets conditionnés dont elle est en charge.
- **L'organisme de recherche : Centre d'études nucléaires (SCK-CEN)** est un organisme d'utilité public placé sous la tutelle du ministère de l'Énergie. Parmi ses missions, SCK-CEN mène notamment des activités de R&D dédiées à la gestion des déchets radioactifs, en collaboration avec l'Ondraf. SCK-CEN dispose à ce titre du laboratoire souterrain Hades (High activity disposal experimental site), situé à Mol, à 225 mètres de profondeur dans l'argile de Boom. Le groupement d'intérêt économique **Euridice**, fondé en 1995 par SCK-CEN et l'Ondraf, assure la gestion et le fonctionnement du laboratoire souterrain Hades.
- **L'électricien Electrabel SA** exploite l'ensemble des 7 réacteurs présents sur le territoire belge. La société Synatom, filiale d'Electrabel SA, a pour mission d'approvisionner les centrales belges en

uranium enrichi et de gérer les combustibles nucléaires usés issus des réacteurs, jusqu'à leur prise en charge définitive par l'Ondraf. À ce titre, **Synatom** gère le conditionnement et l'entreposage des combustibles usés.

En Belgique, la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs relève de l'autorité fédérale. Elle s'inscrit dans un cadre réglementaire formé de divers lois, arrêtés royaux et décisions parlementaires ou ministérielles. Ainsi, la loi du 8 août 1980 crée l'Ondraf-Niras et en définit ses missions (104). La loi du 13 février 2006 (105) précise à l'Ondraf qu'avant de soumettre son plan de gestion à long terme des déchets radioactifs, elle devra désormais préparer une étude environnementale stratégique (SEA) ainsi qu'un projet de Plan déchet et d'en recueillir l'avis de l'AFCN. Plus récemment, la loi du 3 juin 2014 (106) transpose en droit belge la directive 2011/70/Euratom et met ainsi à jour les dispositions d'une gestion sûre et responsable du combustible usé et des déchets radioactifs. Ce décret royal énonce également les principes directeurs sur les modalités de financement de la gestion à long terme des déchets radioactifs et fait ainsi évoluer la loi du 11 avril 2003 (107) dressant les premiers principes de provisions à constituer pour la gestion des matières fissiles.

2.2 Sources, types et quantités de déchets

En Belgique, les déchets radioactifs proviennent à 80 % du secteur électronucléaire, et dans une moindre mesure, de l'industrie, des activités de recherche ainsi que du secteur médical. L'ensemble de ces déchets est classé selon la catégorisation suivante :

- les déchets de type A, à savoir, les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (demi vie inférieure ou égale à 30 ans). Ce type de déchets peut également contenir, dans de faibles quantités (400 Bq/g à 4 000 Bq/g), des radionucléides à vie longue ;
- les déchets de type B comprenant les déchets de faible et moyenne activité à vie longue ;
- les déchets de type C, constitués de déchets de haute activité ayant une capacité thermique élevée (> 20 W/m³). Il s'agit du combustible usé non retraité des centrales nucléaires ou bien encore des déchets vitrifiés issus du retraitement effectué à La Hague.

► NOTE IMPORTANTE

À l'heure actuelle, on estime que l'activité nucléaire en Belgique va produire sur 100 ans environ :

- 70 000 m³ de déchets de type A (FMA-VC) ;
- 11 000 m³ de déchets de type B (FMA-VL) ;
- environ 4 500 m³ de déchets de type C (HA/MA-VL).

2.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

2.3.1 Solutions de gestion actuelle

De 1949 à 1983, la Belgique a participé à des campagnes d'immersion des déchets radioactifs dans l'océan Atlantique, coordonnées pour la plupart par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE. Suite à l'entrée en vigueur de la Convention de Londres (108), cette pratique a cependant été interrompue. À l'heure actuelle, il n'existe pas en Belgique de solution de stockage définitif, quel que soit le type de déchets. Les déchets radioactifs sont donc entreposés sur les sites des centrales nucléaires, à Doel et Tihange, ainsi qu'au sein des stockages temporaires (de surface) exploités par Belgoprocess à Mol et Dessel, après avoir été traités et conditionnés. L'Ondraf travaille cependant sur deux projets de stockage à long terme :

- Un stockage en surface pour les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (type A) prévu sur le site de Dessel. La demande d'autorisation de création a été transmise à l'AFCN en 2013 qui a instruit le dossier et demandé des éléments complémentaires relatifs à la sûreté de l'installation. Un dossier d'évaluation de sûreté a donc été transmis par l'Ondraf à l'AFCN en 2019. L'autorisation pourrait être délivrée d'ici mi-2020 avec une mise en service possible en 2024⁸⁰.
- Un stockage géologique pour les déchets de moyenne et haute activité (types B et C).

2.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité (types B et C)

La recherche d'une solution de stockage à long terme des déchets de haute et moyenne activité a débuté en Belgique dès 1974, sous l'impulsion d'un programme de recherche européen. Dans ce cadre, SCK-CEN a donc entamé des études de conception d'un stockage géologique pour les déchets de type B et C, ainsi que des études d'un site d'implantation. Il s'avère que l'argile de Boom, présente sous le site nucléaire de Mol-Dessel entre 180 mètres et 280 mètres de profondeur, dispose des propriétés intéressantes pour abriter un tel stockage. En 1980, année de création de l'Ondraf-Niras, la construction du laboratoire souterrain Hades, sur le site de Mol-Dessel, a donc débuté pour étudier davantage les propriétés de cette formation géologique. Des programmes de R&D se succèdent désormais au sein de ce laboratoire souterrain, exploité par le groupement d'intérêt économique Euridice depuis 1995. En parallèle de ces travaux de recherche, l'Ondraf développe une approche participative basée sur la mise en place d'un partenariat avec le public et ce, dès la phase d'élaboration du projet. L'Ondraf consulte donc publiquement la population sur la question de la gestion à long terme des déchets radioactifs, et notamment les déchets de type B et C. À ce titre, une conférence de citoyens a été organisée pour échanger sur les choix stratégiques relatifs au projet de stockage géologique (réversibilité, sécurité, financement, etc.). Ces éléments permettent à l'Ondraf d'orienter son plan de gestion à long terme des déchets de haute et moyenne activité, soumis périodiquement à l'AFCN ainsi qu'à ses ministères de tutelles. Entre 2011 et 2018, l'Ondraf a proposé plusieurs versions de stratégies de gestion des déchets radioactifs, incluant notamment la solution de stockage géologique des déchets de type B et C. Si la formation des argiles de Boom était clairement mentionnée dans les premiers plans stratégiques, le dernier en date continue de faire état du stockage profond sans préciser la formation géologique concernée. Le calendrier indicatif de mise en place d'un stockage géologique avancé par l'Ondraf est le suivant :

- autorisation de création et de fonctionnement : T 0 ;
- début de la mise en stockage des déchets de catégorie B : T 0 + 15 ans ;
- début de la mise en stockage des déchets de catégorie C : T 0 + 55 ans (nécessité de laisser refroidir les déchets de type C en surface durant 60 ans minimum) ;
- fermeture complète de l'installation de stockage : T 0 + 100 ans.

2.3.3 Alternatives envisagées

En parallèle des recherches effectuées sur la conception d'un stockage géologique des déchets de type B et C, un effort est également porté sur le développement d'un réacteur expérimental ayant pour objectif de démontrer la faisabilité technique de la transmutation. Le projet Myrrha⁸¹ (Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications) développé sur le site de Mol est aujourd'hui le projet le plus

⁸⁰ Cette synthèse ne s'intéressant qu'aux modalités de gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue, ce projet de stockage ne sera pas détaillé plus avant

⁸¹ <https://myrrha.be/fr/>

avancé en Europe. Le gouvernement belge contribue à hauteur de 558 millions d'euros à la construction du réacteur de recherche, dont la première phase de construction est prévue pour 2019-2038.

► NOTE IMPORTANTE

Dans son avis sur le plan de déchet élaboré par l'Ondraf, l'AFCN considère le stockage en forage comme une option possible, mais aucune étude poussée sur le sujet n'est menée à l'heure actuelle.

2.4 Modalités de financement

Le corpus réglementaire belge définit au travers de différentes lois les mécanismes de financement de la gestion des déchets radioactifs à court, moyen et long termes. À court terme, la gestion des déchets radioactifs est financée par les producteurs de déchets, sur la base de grilles tarifaires revues tous les 5 ans. Pour financer la gestion à long terme des déchets radioactifs, l'Ondraf-Niras constitue des provisions à partir des versements effectués par les bénéficiaires de ses services. Depuis 1999, un « fonds à long terme » est géré par l'Ondraf-Niras et prend en charge les fonds versés par les producteurs pour les futurs services de stockage à long terme. À noter que ces fonds sont versés par les producteurs depuis 1985. Depuis 1992, un fonds d'insolvabilité a été mis en place afin de pouvoir atténuer les conséquences possibles d'une faillite ou d'une insolvabilité de la part d'un des producteurs de déchets. Ce fonds s'alimente par un prélèvement de 5 % sur les fonds déjà versés par les producteurs pour la gestion de leurs déchets. Dans son programme national de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs paru en 2015, l'Ondraf envisageait les coûts suivants :

- pour les déchets de type A, (70 000 m³ estimés) le coût du projet de stockage (construction, fonctionnement, fermeture et contrôle) est calculé à 1,25 milliards d'euros₂₀₁₂ (coût non actualisés, marges pour aléas incluses) ;
- pour les déchets de type B et C (4 500 m³ estimés), en 2015, le coût du projet de stockage (construction, fonctionnement, fermeture et contrôle) est calculé à 3,2 milliards d'euros₂₀₁₂ (coût non actualisés, marges pour aléas incluses) (109). En 2018, Le Conseil d'Administration de l'Ondraf a diffusé un communiqué où il « a pris acte de l'estimation du coût du stockage géologique des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie. Pour ce qui est du calcul des tarifs, l'estimation provisoire s'élève à 8 milliards d'euros sur deux ans. » Ainsi, « une nouvelle estimation des coûts sera disponible fin 2020. Pour le calcul des provisions, l'Ondraf propose, par précaution, que la Commission des provisions nucléaires tienne compte d'un montant de 10,7 milliards d'euros. » (110).

Pour le cas spécifique des centrales nucléaires, la loi du 11 avril 2003 (107) confie à la société Synatom la gestion des provisions constituées par les exploitants pour couvrir les coûts de démantèlement des centrales ainsi que les coûts de gestion des déchets radioactifs associés. La gestion des provisions par Synatom est contrôlée par la Commission des provisions nucléaires. À fin 2018, les provisions gérées par Synatom atteignaient les 11,1 milliards d'euros dont 55 % (6,158 milliards d'euros) dédiés à la gestion du combustible usé. À noter qu'en 2016, en réaction à la baisse constante des taux d'intérêt, la Commission des provisions nucléaires a recommandé de baisser progressivement le taux d'actualisation à 3,5 % en 2018.

Annexe 3 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Canada

3.1 Contexte national

En 2018, le Canada comptait 37 millions d'habitants avec un PIB d'environ 1 450 milliards d'euros.

3.1.1 Politique énergétique

Depuis le début des années 1960, le Canada utilise l'énergie nucléaire pour la production d'électricité à partir de réacteurs spécifiques de type Candu (Canada deuterium uranium) utilisant de l'uranium naturel issu des gisements canadiens. Aujourd'hui, 5 centrales situées dans l'Ontario, le Québec et au Nouveau Brunswick abritent 22 réacteurs nucléaires dont 19 sont encore en fonctionnement. À noter que c'est dans l'Ontario que la majorité des centrales nucléaires sont installées, fournissant pratiquement 60 % de la production d'électricité de la province. Sur le plan national, l'énergie nucléaire représente environ 17 % de l'énergie consommée au Canada. Des projets de nouveaux réacteurs ont été suspendus mais il n'est pas envisagé d'arrêter l'exploitation de l'énergie nucléaire. Le Canada ne traite pas le combustible usé, qui est entreposé directement après refroidissement.

Le Canada a également une longue histoire dans la recherche et le développement des technologies nucléaires et l'exploitation des mines d'uranium (2^e pays producteur d'uranium). Il en découle aujourd'hui des « déchets historiques » ainsi que des sites contaminés clairement identifiés dans les inventaires.

3.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

Au Canada, les acteurs principaux de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (111) (112) :

- **Les électriciens**, se regroupent majoritairement autour de 3 compagnies principales. **Ontario power generation (OPG)**, qui est le plus gros producteur d'électricité du Canada. Il détient 20 réacteurs nucléaires situés dans la province de l'Ontario. Sur ces 20 réacteurs, 2 sont à l'arrêt, 10 sont exploités par OPG et 8 sont loués et exploités par la société Bruce Power. OPG est responsable de la gestion des déchets radioactifs produits par l'ensemble des 20 réacteurs en sa possession. Au Nouveau-Brunswick et au Québec, les sociétés d'énergie nucléaire **Énergie NB** et **Hydro-Québec (HQ)** détiennent chacune un réacteur : point Lepreau et Gentilly II respectivement. En décembre 2012, Gentilly II a cessé ses activités.
- **L'organisme de recherche Atomic energy of Canada limited (EACL)** est une entreprise publique de technologie et de génie nucléaire qui œuvre particulièrement dans la R&D en matière de stockage des déchets radioactifs. Dans les années 1980-1990, EACL a notamment mis en œuvre un laboratoire de recherche souterrain plus connu sous le nom de URL (Underground research laboratory). Suite à des réductions drastiques de ses budgets, EACL a dû diminuer une grande partie de ses activités. L'URL a ainsi été arrêté en 2003 et définitivement fermé après travaux d'assainissement en 2010. Pour maintenir son expertise, EACL a lancé en 2014 sa filiale **Laboratoires nucléaires canadiens (LNC)** qui est désormais en charge de la gestion des déchets radioactifs historiques du Canada.
- **Le gestionnaire**, la société de gestion des déchets nucléaires **Nuclear waste management organisation (SGDN ou NWMO)** a été créée en 2002. Cette organisation réunit les 3 électriciens (OPG, Énergie NB et HQ) et a pour mission de rechercher les solutions de gestion à long terme des déchets de haute activité et du combustible usé.
- **L'autorité de sûreté nucléaire** nommée **Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN)**, est l'unique organisme de réglementation nucléaire du Canada. Il est responsable de la réglementation et de la surveillance des opérations menées par l'industrie nucléaire.

La politique cadre en matière de déchets radioactifs (1996 (113)) du gouvernement du Canada définit un ensemble de politiques, de lois et d'organisations qui œuvrent pour la gestion des déchets radioactifs. Le corpus réglementaire de cette politique cadre comprend notamment les lois suivantes :

- la loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires (2000 (114)), qui a créé la CCSN et en définit ses missions ;
- la loi sur les déchets de combustible nucléaires (2002 (115)), qui établit un cadre pour une solution nationale de gestion à long terme des déchets de haute activité et du combustible usé et a conduit à la création de la SGDN/NWMO.

3.2 Sources, types et quantités de déchets

Dès les années 1930, l'industrie du radium puis le traitement de l'uranium ont généré les premiers déchets radioactifs au Canada, auxquels se sont ensuite ajoutés depuis les années 1960 les déchets issus de l'industrie électronucléaire. En 2008, le Canada a revu son système de classification des déchets pour s'accorder aux recommandations faites par l'Agence internationale de l'énergie atomique. Quatre grandes catégories de déchets radioactifs ont ainsi été établies :

- les déchets radioactifs de faible activité ;
- les déchets radioactifs de moyenne activité ;
- les déchets radioactifs de haute activité ;
- les déchets issus des mines et usines de concentration d'uranium.

Les déchets de faible et moyenne activité concernent essentiellement le fonctionnement des réacteurs nucléaires. À la fin de l'année 2013, l'inventaire des déchets radioactifs comptait environ 2 387 442 m³ de déchets de faible et moyenne activité, avec une prévision à l'horizon 2050 dépassant les 2 567 541 m³. Les déchets de haute activité se caractérisent quant à eux par un fort dégagement calorifique supérieur à 2 kW/m³. Il s'agit principalement de combustible usé. En 2013, l'inventaire faisait état de 10 021 m³ de déchets de haute activité avec une prévision pour fin 2050 de 20 660 m³.

3.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

3.3.1 Solutions de gestion actuelle

À l'heure actuelle, aucune installation de stockage définitive n'est en service pour permettre la gestion des déchets radioactifs. Seuls des entreposages temporaires, bien souvent situés au niveau des centrales, permettent de gérer les déchets radioactifs en attendant la mise en place des projets de stockage définitifs pour les différentes catégories de déchets. À noter que sur le site de la centrale de Bruce, un entreposage temporaire accueille aujourd'hui quelques 77 000 m³ de déchets de faible et moyenne activité. Cet entreposage temporaire est géré par OPG.

Trois projets de stockage définitifs sont envisagés à l'heure actuelle :

- un projet de stockage géologique réservé aux déchets de haute activité porté par la SGDN/NWMO ;
- un projet de stockage géologique dédié aux déchets de faible et moyenne activité à vie longue, situé à proximité de la centrale nucléaire de Bruce à Kincardine (province de l'Ontario) et porté par OPG ;
- un projet de stockage en sub-surface, porté par les LNC, visant à abriter jusqu'à 1 million de m³ de déchets de faible activité hérités des activités de recherche du site du Laboratoire national de Chalk River à Ottawa⁸².

⁸² Cette synthèse ne s'intéressant qu'aux modalités de gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue, ce dernier projet de stockage ne sera pas détaillé ci-après.

3.3.2 Projet de stockage des déchets de faible à moyenne activité à vie longue

OPG envisage la réalisation d'un stockage géologique profond pour recevoir les déchets de faible et moyenne activité à vie longue produits par ses réacteurs. Ce site sera localisé à proximité de l'actuelle installation de stockage temporaire située sur le site nucléaire de Bruce. Le stockage est prévu à 680 mètres de profondeur, dans une formation argilo-calcaire surmontée par une couche de schiste argileux de 200 mètres d'épaisseur. Le stockage est dimensionné pour recevoir environ 200 000 m³ de déchets. En 2001, la municipalité de Kincardine s'est portée candidate pour abriter ce futur stockage géologique. Fin 2005, la procédure d'approbation réglementaire a été lancée avec l'instruction successive de différents dossiers d'évaluation (évaluation de sûreté, évaluation d'impact environnemental, etc.). En mai 2015, le projet de stockage sur le site de Kincardine a été jugé acceptable pour gérer à long terme des déchets faiblement et moyennement radioactifs. Il a cependant été demandé à OPG de compléter ses dossiers pour :

- apporter des détails sur les autres solutions alternatives ;
- envisager la possibilité de stocker sur le même site les déchets de haute activité et donc évaluer les possibles effets cumulatifs.

À ce jour, l'autorisation du projet reste incertaine. OPG estime qu'il faut encore compter 5 à 7 ans avant d'obtenir les autorisations administratives, lancer les travaux et pouvoir *in fine* exploiter le site.

3.3.3 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute activité

Dès les années 1970, des recherches sur la manière de gérer les déchets de haute activité ont été menées au Canada. Plusieurs pistes de gestion ont été envisagées (à savoir, option de stockage dans les fosses de subduction⁸³, entreposage centralisé, etc.) et plus particulièrement celle du stockage géologique. En 1978, sur la demande du gouvernement fédéral, EACL a entrepris divers programmes de recherche dédiés au stockage en formation géologique. Ces programmes de recherches, qui se sont échelonnés de 1979 à 2003, ont notamment impliqué la mise en place du laboratoire souterrain URL (Underground Research laboratory, laboratoire de recherche souterrain) dans la province de Manitoba. Initialement, le fonctionnement du stockage géologique était prévu pour le début des années 2000. Cependant, au cours des années 1990, le gouvernement fédéral a souhaité que le projet de stockage géologique se développe en concertation avec l'ensemble des parties prenantes concernées. Plusieurs audiences et consultations publiques ont ainsi eu lieu, sous le regard d'une commission d'évaluation indépendante : la Commission Seaborn. En 1998, la Commission Seaborn a fait valoir ses recommandations à savoir que sur le plan technique, le concept de stockage géologique profond porté par EACL était suffisant. En revanche, ce concept n'avait pas l'appui du public et ne pouvait donc pas être accepté dans sa forme actuelle. Ces conclusions ont alors conduit à la mise en place de la loi sur les déchets de combustible nucléaires (2002 (115)), impliquant la création de la SGDN/NWMO qui a pour mission d'étudier de nouvelles options de gestion à long terme des déchets de haute activité (99).

Parmi l'ensemble des options de stockage envisagées (par exemple stockage géologique, entreposage sur les sites des réacteurs et entreposage centralisé profond ou en surface), la SGDN/NWMO a proposé en 2005, à la suite de nombreuses consultations du public, une option appelée « gestion adaptative progressive » (GAP), acceptée par le gouvernement en 2007. Cette option résulte du constat qu'une solution de stockage géologique profond laisse peu de chance de pouvoir intervenir sur le stockage après sa fermeture. Une solution d'entreposage en surface impliquerait quant à elle un cycle indéfini d'activités de surveillance, de remplacement et de rénovation des installations, avec *in fine* un transfert de responsabilité aux générations futures. La GAP permet de son côté une gestion séquentielle concertée, dont chaque étape est évaluée et soumise à concertation avant de passer aux étapes suivantes. La GAP prévoit à l'heure actuelle trois phases successives :

- la première phase, prévue pour une durée d'environ 30 ans, envisage d'entreposer les déchets sur le site des centrales nucléaires et de lancer en parallèle la construction d'un laboratoire souterrain

⁸³ Option abandonnée en 2005.

ainsi qu'une campagne de recherche de sites où les déchets de haute activité pourrait être confinés et isolés dans un stockage géologique souterrain ;

- la deuxième phase, d'une trentaine d'années aussi, prévoit un entreposage centralisé ou le maintien sur site des déchets de haute activité. Sur la base des résultats issus des recherches menées au sein du laboratoire souterrain, l'opportunité de construire une installation de stockage géologique sera évaluée ;
- la dernière phase pourrait *in fine* consister en la réalisation d'un stockage géologique proprement dit.

Depuis 2010, la SGDN/NWMO s'est engagée dans une campagne de recherche de sites candidats pour abriter un stockage géologique profond. Le processus de sélection du site est piloté par les collectivités et a été conçu de manière à s'assurer que le site choisi respecte l'ensemble des prérequis techniques et scientifiques, d'une part, et que la communauté locale est pleinement informée et volontaire pour mettre en œuvre ce projet, d'autre part.

Un total de 21 collectivités (toutes situées en Ontario) a exprimé leur intérêt pour abriter un stockage géologique profond. La SGDN/NWMO a retenu cinq propositions de site qui vont être davantage caractérisées. Des études géologiques exploratoires ont d'ores et déjà été engagées sur certains sites. En 2019, la liste des sites est réduite à 2 possibilités : Ignace dans le nord-ouest de l'Ontario et Huron-Kinloos dans le sud de l'Ontario. À l'heure actuelle, le calendrier prévoit la sélection d'un site pour l'implantation du stockage géologique d'ici 2023. Le fonctionnement pourrait débuter entre 2040 et 2045, pour une durée de 40 ans environ. Ensuite, une surveillance renforcée du stockage est prévue pour une durée de 70 ans.

3.4 Modalités de financement

En vertu du principe « pollueur-payeur », les producteurs de déchets se doivent d'assurer le financement de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits. La loi sur les déchets de combustible nucléaires (2002 (115)) exige ainsi que chaque électricien établisse un fonds en fiducie et l'alimente annuellement. Ces fonds en fiducie sont majoritairement alimentés par OPG, Énergie NB, Hydro-Québec et EACL. À la fin de 2016, le solde des fonds en fiducie s'élevait à 4 milliards de dollars canadiens (soit environ 2,6 milliards d'euros). En mars 2020, la SGDN a présenté une « *estimation du coût (est) basée sur une quantité prévue d'approximativement 5,2 millions de grappes de combustible. D'après ce volume, le coût du cycle de vie entier de la GAP - du début du processus de sélection d'un site, en 2010, jusqu'à l'achèvement du projet dans environ 150 ans - serait approximativement de 23 milliards de dollars canadiens*²⁰¹⁵ », soit environ 15 milliards d'euros (116).

Annexe 4 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Chine

4.1 Contexte national

En 2018, la Chine comptait 1 385 millions d'habitants avec un PIB d'environ 11 532 milliards d'euros.

4.1.1 Politique énergétique

Le parc électronucléaire chinois s'est développé dans les années 1990, avec la mise en service de sa première centrale nucléaire -Daya Bay I- en 1993. Depuis, la construction de nouvelles centrales nucléaires n'a eu de cesse de se poursuivre, dans l'objectif de répondre au développement économique croissant du pays ainsi qu'aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes en ce qui concerne notamment la pollution de l'air. Fin 2018, la Chine comptait 46 réacteurs en fonctionnement (dont 70 % ont été construits lors de la dernière décennie), ainsi que 11 réacteurs en construction. Environ 4 % de l'électricité produite en Chine est d'origine nucléaire, le reste de l'électricité étant produit en majorité (70 %) par des centrales à charbon. Dans son 13^e plan quinquennal sur le développement économique et social (2015-2020), le gouvernement chinois a affirmé sa volonté d'aller progressivement vers une production d'énergie décarbonée, en ayant pour premier objectif d'atteindre la part de 20 % d'énergie propre et non fossile d'ici 2030. Dans ce contexte, le développement de l'énergie nucléaire prend tout son essor pour tenter de contribuer à hauteur de 6 % à 7 % à la production électrique nationale d'ici 2030. Pour alimenter un tel parc nucléaire, la Chine vise son autonomie sur l'ensemble du cycle du combustible. Elle exploite ainsi des mines d'uranium sur son territoire ainsi qu'à l'étranger, développe des usines d'enrichissement ainsi que celles de fabrication du combustible. La Chine a également opté pour une stratégie de retraitement du combustible. Plusieurs développements sont en cours, en collaboration avec Orano. La majorité des centrales chinoises se situe sur la côte littorale de la mer de Chine. Les installations stratégiques d'enrichissement d'uranium et de retraitement du combustible ont quant à elles été implantées à l'intérieur des terres, majoritairement à l'ouest et au nord-ouest de la Chine, dans les provinces de Sichuan, Shaanxi et Gansu.

4.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Chine, les acteurs principaux de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (117) :

- l'**autorité de sûreté**, appelée **National nuclear safety administration (NNSA)**, qui supervise l'ensemble des installations nucléaires et contrôle le respect des normes de sûreté et de radioprotection ;
- le **ministère de l'environnement**, le **Ministry of environmental protection (MEP)** qui, en tant qu'autorité nationale en matière d'environnement, élabore les réglementations et les lois associées dans le domaine nucléaire, et supervise ainsi la NNSA dans ses activités ;
- l'**agence pour l'énergie atomique**, la **China atomic energy authority (CAEA)**, qui est en charge du développement de la politique du cycle du combustible. La CAEA supervise également les projets de stockage des déchets radioactifs ;
- la **société nationale nucléaire**, **China national nuclear corporation (CNNC)** qui gère les activités de R&D ainsi que l'ensemble de la chaîne du combustible, allant de la prospection d'uranium au fonctionnement de la production électrique, en passant par le retraitement du combustible. La CNNC gère également le traitement et le stockage des déchets radioactifs. Pour mener ses activités, la CNNC s'appuie sur plusieurs de ses filiales dont notamment :
 - ✓ **Everclean environmental engineering corporation (EEEC)** qui est en charge du transport des matières radioactives ainsi que des travaux sur les stockages de déchets de faible et moyenne activité. Plus précisément, EEE est responsable des stockages de Diwopu (province de Gansu) et Beilong (province de Guangdong) ;

- le **centre national géoscientifique de l'uranium, Beijing research institute of uranium geology (BRIUG)** responsable des programmes d'identification de sites appropriés pour l'implantation d'un stockage géologique dédié aux déchets de haute activité ;
- la **compagnie en charge du management de l'énergie nucléaire, China nuclear power engineering company (CNPEC)** assure la construction des centrales nucléaires, les services d'ingénierie ainsi que ceux liés aux activités de démantèlement. Par ailleurs, elle a pour mission de faire les études de conception du stockage profond (118).

Dès la construction de ses premières centrales nucléaires, la Chine a établi et maintenu un cadre législatif régissant la sûreté des installations nucléaires ainsi que la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé. Depuis 1986, les installations nucléaires (aval du cycle y compris) sont régies par les Regulations of the people's republic of China on safety control of civilian nuclear installations (119). Depuis, le corpus législatif a été amendé avec notamment la promulgation en 2003 d'une loi sur la prévention des pollutions radioactives, l'information du public et la gestion des déchets (Law of the People's republic of China on prevention and control of radioactive pollution (120)). En 2011, une loi relative à la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (Regulations on safety of radioactive waste management) a également été approuvée par l'Assemblée nationale populaire.

4.2 Sources, types et quantités de déchets

En Chine, les déchets radioactifs proviennent en majorité des centrales nucléaires, des réacteurs de recherche, des activités militaires, du cycle du combustible nucléaire ou encore de l'exploitation de l'uranium. Pour classer ses déchets radioactifs, le gouvernement chinois s'est essentiellement basé sur leur niveau d'activité. Globalement la classification chinoise intègre trois grandes catégories de déchets :

- les déchets radioactifs de faible activité, comprenant les déchets dont l'activité n'excède pas 4.10^{+6} Bq/kg.
- les déchets de moyenne activité, se caractérisant par une activité située entre 4.10^{+6} Bq/kg et 4.10^{+11} Bq/kg et dont la capacité thermique n'excède pas 2 kW/m^3 .
- les déchets de haute activité, définis par une activité excédant 4.10^{+11} Bq/kg et une capacité thermique supérieure à 2 kW/m^3 . Généralement, cette catégorie de déchets comprend les déchets générés par le combustible usé provenant des réacteurs nucléaires ou de recherche et de son retraitement.

Au 31 décembre 2016, l'industrie électronucléaire avait produit environ 5 849 tonnes de combustible usé. Un total de $13\,524 \text{ m}^3$ de déchets solides de faible et moyenne activité sont quant à eux stockés au sein de deux sites de stockage en service actuellement (Diwopu et Beilong).

4.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

La stratégie chinoise en matière de gestion des déchets radioactifs définit que les déchets de faible et moyenne activité seront stockés dans des centres régionaux tandis que les déchets de haute activité seront placés dans un centre national à savoir, un stockage géologique profond.

4.3.1 Solutions de gestion actuelle

À l'heure actuelle, les déchets de haute activité (essentiellement du combustible usé) provenant des centrales nucléaires sont d'abord stockés dans les piscines d'entreposage des centrales (36 piscines recensées) pour une période d'environ 5 ans. Un entreposage centralisé du combustible usé a été construit sur le site nucléaire de Lanzhou, à proximité d'un complexe nucléaire militaire ainsi que d'une usine d'enrichissement du combustible, dans la province de Gansu. Il est destiné à recevoir le combustible usé provenant des piscines d'entreposage des centrales.

Pour ce qui concerne les déchets de faible et moyenne activité, ils sont eux-aussi entreposés de manière temporaire, pour une durée de 5 ans maximum, sur les sites des centrales nucléaires. Pour le stockage à long terme de ce type de déchets, des centres de stockages régionaux sont prévus. À l'heure actuelle, deux centres de stockage régionaux sont en service :

- un site implanté à proximité d'une usine pilote de retraitement, près de la ville de Diwopu, dans la province de Gansu, dans le nord-ouest de la Chine. Le concept est celui d'un stockage en tranchées ouvragées. Sa capacité actuelle est de 60 000 m³ pouvant être augmentée à 200 000 m³ ;
- un site implanté à Beilong, dans le sud de la Chine, dans la province du Guangdong, à 5 km de la centrale de Day Bay. Le concept est celui d'un stockage en surface comportant un réseau de drainage souterrain. Sa capacité est de 8 800 m³ pouvant être étendue à 80 000 m³.

Au total, cinq sites de stockages dédiés aux déchets de faible et moyenne activité sont prévus en Chine. Un total de trois sites de stockage sont donc actuellement en cours de conception avec recherche de localisation potentielle, plus précisément dans les régions est et sud de la Chine.

4.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

Le gouvernement chinois a retenu l'option du stockage géologique profond pour la gestion à long terme des déchets de haute activité, qui, d'après les choix stratégiques du gouvernement, seront des déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible. La recherche d'un site pouvant abriter un tel stockage a débuté dès 1986 et se poursuit encore à l'heure actuelle. Les Guidelines on research and development planning for geological disposal of high level radioactive waste (117), publiées en 2006 conjointement par le MEP, la CAEA et le ministère des sciences et technologies, définissent la stratégie de R&D nécessaire à la mise en place du stockage géologique. Ces guidelines prévoient notamment le calendrier suivant :

- 2006-2020 : identification d'un site pour la construction d'un laboratoire souterrain ;
- 2021-2040 : mise en place des programmes de recherche en laboratoire souterrain pour caractériser la formation géologique prête à abriter le stockage et réaliser l'ensemble des évaluations de sûreté. En parallèle, développement du prototype de stockage ;
- 2040-2050 : construction effective de l'installation de stockage ;
- 2050 : mise en service du stockage.

Pour répondre à ces enjeux, la CAEA ainsi que l'ensemble de ses filiales ont donc concentré leurs efforts sur la recherche du futur site du laboratoire souterrain. En 1986, cinq zones d'investigation avaient été sélectionnées à savoir : à l'est (formation granitique), au sud-ouest (formations granitique et argilo-schisteuse), au sud (formation granitique), au nord-ouest (formations argileuse, granitique et argilo-schisteuse) de la Chine, ainsi qu'en Mongolie intérieure (formation granitique). Aujourd'hui, les investigations se concentrent davantage sur la zone nord-ouest de la Chine, au niveau de la province de Gansu, dans la région de Beishan, où trois sites candidats sont à l'étude. Un laboratoire souterrain devrait prochainement être construit sur l'un de ces trois sites. Le stockage géologique envisagé se fera alors en formation granitique, à 500 mètres de profondeur.

4.3.3 Alternatives envisagées

En parallèle des recherches effectuées sur la conception d'un stockage géologique des déchets de haute activité, la Chine étudie également la question de la transmutation. Le projet CiADS (China initiative accelerator driven system) est en cours de construction (2018-2024).

4.4 Modalités de financement

Le système politique chinois défini aujourd'hui implique que le financement de la gestion des déchets radioactifs est assuré par l'État. À noter cependant que le système évolue progressivement. Désormais, une taxe de 2,6 yuans chinois/kWh (soit 0,33 euros/kWh) est prélevée à partir de la cinquième année de fonctionnement de chaque réacteur nucléaire pour contribuer à la gestion des déchets radioactifs et du combustible utilisé.

Annexe 5 Gestion des déchets de type HA et MA-VL et en Espagne

5.1 Contexte national

En 2018, l'Espagne comptait près de 47 millions d'habitants avec un PIB d'environ 1 200 milliards d'euros.

5.1.1 Politique énergétique

En Espagne, l'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité a débuté en 1968, avec la mise en service du réacteur José Cabrera. La construction de nouvelles centrales nucléaires s'est ensuite poursuivie, puis s'est interrompue en 1984 à la suite d'un moratoire nucléaire. Ce moratoire fut motivé par plusieurs raisons : raisons techniques, raisons dérivées de la demande d'électricité et de l'opposition à l'énergie nucléaire, notamment en Estrémadure et au Pays Basque. Le programme nucléaire espagnol comportait également des installations de l'ensemble du cycle du combustible (extraction, traitement du minerai, fabrication du combustible, traitement du combustible usé). En 1983, l'évolution du marché de l'uranium (baisse du coût de l'uranium) a cependant conduit le gouvernement à arrêter le traitement du combustible usé.

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire représente environ 20 % de l'énergie consommée en Espagne, avec 7 réacteurs encore en activité et 3 réacteurs en phase de démantèlement (Vandellós 1 arrêté en 1990, José Cabrera mis à l'arrêt en 2006 et Santa María de Garoña en 2017). La durée de fonctionnement des centrales espagnoles est prévue pour environ 40 ans. Toutefois, depuis avril 2019, le ministère de la transition écologique envisage de prolonger la durée de vie de certaines centrales. Une étude est en cours au sein des centrales concernées pour évaluer la rentabilité économique d'une telle option.

5.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Espagne, les acteurs de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (121) (122) :

- Les **ministères** et plus particulièrement le **ministère de l'énergie, du tourisme et de la stratégie numérique** (MINETAD) ainsi que le ministère de la transition écologique (MITECO) ont pour rôle de réglementer les activités nucléaires et leurs impacts environnementaux en délivrant des autorisations liées à la construction, le fonctionnement et la fermeture des installations nucléaires. La Direction pour l'énergie et les mines, dépendant du MINETAD, assure quant à elle la tutelle d'ENRESA.
- L'**autorité de sûreté nucléaire**, nommée **Conseil de sûreté nucléaire** (CSN), est indépendante depuis sa création en 1980 et est la seule autorité compétente en matière de sûreté et de radioprotection. Cette autorité assure la réglementation nucléaire, l'examen des autorisations nécessaires aux installations nucléaires ainsi que la surveillance de ces installations.
- Le **gestionnaire**, **Empresa nacional de residuos radioactivos SA** (ENRESA), crée en 1984 et qui depuis 2010, suite à la loi 11/2009, est une entreprise publique rendant compte de ses activités au MINETAD. Les missions d'ENRESA se concentrent sur la conception, la construction et le fonctionnement des installations de stockages temporaires et définitifs dédiés aux déchets radioactifs. ENRESA est également responsable du démantèlement des installations nucléaires espagnoles.
- Les **électriciens**, sont au nombre de 4 entreprises privées : ENDESA, IBERDROLA, UEFSA et HIDRO CANT/ABRICO.

L'arrêté Royal 102/2014 du 21 février 2014 fait la transcription en droit espagnol de la directive n° 2011/70/Euratom (21) et détaille ainsi les dispositions d'une gestion sûre et responsable du combustible nucléaire usé et des déchets radioactifs à mettre en œuvre en Espagne. Ces dispositions, déjà existantes dans la loi espagnole (25/1964, 54/1997, 1349/2003, 11/2009), permettent avant tout de rassembler l'ensemble des textes régissant la gestion des combustibles nucléaires et des déchets radioactifs d'activités civiles (122).

Les choix stratégiques en matière de gestion des déchets radioactifs sont approuvés par le gouvernement espagnol. Tous les 4 ans, un plan national de gestion des déchets radioactifs est donc publié par le MINETAD. Ce plan comprend un volet technique présentant le programme stratégique et les actions de recherche et développement à mener par ENRESA, ainsi qu'un volet économique et financier.

5.2 Sources, types et quantités de déchets

L'Espagne a commencé à produire des déchets radioactifs à partir des années 1950 environ. Aujourd'hui, les déchets radioactifs proviennent essentiellement des 7 réacteurs encore en activité, de l'usine de fabrication de combustible nucléaire ainsi que de plus d'un millier de producteurs utilisant des radioéléments à des fins industrielles, médicales ou de recherche. Une autre source importante de déchets est le démantèlement des trois réacteurs en arrêt. L'arrêt du retraitement du combustible usé en 1983 a conduit à considérer aujourd'hui le combustible usé comme un déchet, qui est stocké directement sur le site des centrales. À noter cependant que dans les années 1980, une partie du combustible espagnol a été transporté en France et en Angleterre pour y être traité.

La classification des déchets radioactifs en Espagne est conforme aux critères retenus par l'Agence internationale de l'énergie atomique ainsi que par la Commission européenne. Comme en France, la classification espagnole prend en compte l'activité des déchets ainsi que la demi-vie des principaux radionucléides contenus dans les déchets, pouvant être courte à moyenne (demi-vie inférieure à 30 ans) ou longue (demi-vie supérieure à 30 ans). Les déchets radioactifs sont donc classés en deux grandes catégories :

- les déchets à vie courte, pouvant être de très faible, faible et moyenne activité ;
- les déchets de haute activité incluant le combustible usé ainsi que les déchets issus du retraitement du combustible usé opéré avant 1983. Les « déchets spéciaux » sont associés aux déchets de haute activité en raison de leurs propriétés radiologiques. Ils comprennent principalement les déchets de moyenne activité à vie longue issus des premiers réacteurs en démantèlement.

En tenant compte d'une durée de vie des centrales fixée à 40 ans, les estimations des volumes de déchets prévus une fois l'ensemble des réacteurs nucléaires démantelés sont de 176 000 m³ de déchets de très faible et faible activité, entre 544 m³ et 614 m³ de déchets spéciaux et environ 6 640 tML pour les déchets de haute activité et le combustible usé (123).

5.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

5.3.1 Solutions de gestion actuelle

Depuis 1992, le centre de stockage d'El Cabril (région de Cordoue) est exploité par ENRESA afin de stocker en surface les déchets de faible et moyenne activité produits en Espagne. Ce centre de stockage est également équipé pour pouvoir traiter et réduire le volume des déchets. En 2008, une zone supplémentaire sur le site a été spécifiquement dédiée au stockage des déchets de très faible activité. La capacité prévue pour ce centre de stockage est de 50 000 m³ pour les déchets de faible activité et environ 60 000 m³ pour les déchets de très faible activité.

Pour ce qui concerne le combustible usé issu du fonctionnement des centrales nucléaires, il a été entreposé dès les années 1990 sur les sites de chaque centrale, au sein de piscines. La capacité de ces piscines étant arrivée à saturation, les entreposages d'origine ont été progressivement remplacés par d'autres unités plus compactes. Au début des années 2000, de nouvelles capacités se sont révélées nécessaires dans la plupart des centrales nucléaires. Des installations individuelles ont ainsi été progressivement mises en service et construites sur le site de nombreuses centrales nucléaires encore en opération. Les sociétés d'énergie nucléaire sont responsables de ces installations d'entreposage décentralisées.

5.3.2 Solution de gestion temporaire envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

À moyen terme, la principale stratégie envisagée pour les déchets de haute activité ainsi que pour les déchets spéciaux consiste à les entreposer au sein d'un centre temporaire appelé Almacén Temporal Centralizado (ATC), qui serait sous la responsabilité d'ENRESA. En 2012, la municipalité de Villar de Cañas (province de Cuenca) a été désignée par le conseil des ministres comme site pouvant accueillir l'ATC. L'autorité de sûreté (CSN) a approuvé le choix du site ainsi que sa conception, qui est similaire à celle de l'installation de Habog aux Pays-Bas (entreposage à sec). La période de fonctionnement prévue pour ce centre de stockage temporaire est d'environ 60 ans, avec la possibilité de prolonger l'installation pendant 100 ans. Cet entreposage temporaire pourra permettre d'accueillir les petites quantités de déchets issus du retraitement du combustible réalisé en Angleterre et France, tels que par exemple, les déchets de haute activité vitrifiés provenant du site de retraitement de La Hague. Le projet d'installation progressait bien, ENRESA avait notamment fait une demande d'autorisation officielle du projet auprès du CSN. Le ministère de la transition écologique a cependant demandé fin 2018 au CSN de suspendre temporairement la décision concernant l'autorisation du projet. Cette suspension est à replacer dans le contexte d'une interrogation actuelle du gouvernement espagnol sur la possibilité de prolonger la durée de vie de certaines centrales.

5.3.3 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

Le stockage géologique en profondeur est la solution de référence envisagée en Espagne pour gérer de manière définitive les déchets de haute activité et les déchets spéciaux. Depuis 1985, des travaux ont donc été menés pour étudier les différentes options de stockage en profondeur. Jusqu'ici, les recherches se sont axées sur :

- la réalisation d'un plan de sélection de site, élaboré jusqu'en 1996. Ce plan a permis de conclure que le sous-sol espagnol abrite une abondance de granite, d'argile et, dans une moindre mesure, de formations salines. Entre 1986 et 1996, une analyse précise de ces formations géologiques a été réalisée pour identifier celles pouvant abriter un stockage profond de déchets radioactifs. À la suite de ces travaux, un inventaire des formations géologiques candidates a été créé ;
- l'élaboration de modèles conceptuels d'une installation de stockage profond dans chacune des couches géologiques identifiées ;
- l'évaluation des modèles conceptuels visant à démontrer que les différentes couches géologiques envisagées permettent de respecter les critères de sûreté.

À l'heure actuelle, la construction du stockage géologique est prévue pour les années 2050, avec une phase de fonctionnement envisagée à partir des années 2060. La chronologie suivante a été proposée par l'Espagne lors de son dernier rapport remis à la Joint Convention (2017) (122) :

- phase 1 (2016-2020) : mise à jour des connaissances ;
- phase 2 (2020-2023) : évaluation des connaissances et orientation des phases futures ;
- phase 3 (2023-2027) : processus de sélection du site ;
- phase 4 (2028-2035) : analyse des sites candidats ;
- phase 5 (2036-2050) : caractérisation du site et vérification de son adéquation ;
- phase 6 (2051-2063) : licence et construction ;
- phase 7 (2063-2068) : première mise en service ;
- phase 8 (2069 et ensuite) : fonctionnement.

5.3.4 Alternatives envisagées

Parallèlement, aux recherches menées sur le stockage géologique, le plan national de gestion des déchets radioactifs incite ENRESA à poursuivre les recherches sur la séparation-transmutation. Ces dernières années, un effort important a donc été effectué par ENRESA pour suivre l'évolution des technologies dans ce domaine. La plupart des travaux réalisés sont de nature préliminaire et concernent essentiellement des analyses de faisabilité, avec un contenu essentiellement théorique.

5.4 Modalités de financement

La loi 11/2009 régit le dispositif de fonds de financement dédié à la gestion des déchets radioactifs et du démantèlement (122). La gestion financière du fonds est réalisée par ENRESA, sous le contrôle du MINETAD. Les exploitants nucléaires, produisant la plus grande quantité de déchets radioactifs sont les principaux contributeurs au fonds de financement. Les exploitants se voient ainsi taxés sur la vente des MWh générés. Selon l'Association nucléaire mondiale (WNA), cette taxe s'élève à environ à 3 €/MWh (environ 170 millions d'euros par an sur la base d'une production annuelle de 57 TWh). Les prestations de service d'ENRESA auprès notamment des petits producteurs de déchets alimentent également ce fonds. Les revenus du fonds sont investis sur le marché financier et ces actifs génèrent des revenus supplémentaires qui, à leur tour, viennent compléter ce fonds de financement. À noter que la loi stipule que de telles opérations d'investissement sont régies par les principes de sécurité, de rentabilité et de liquidité.

Début 2018, ce fonds de financement s'élevait à environ 5 milliards d'euros, pour une somme requise de 13 milliards d'euros d'ici 2070. D'après l'Association nucléaire mondiale, le taux d'actualisation serait de 2,5 %.

Annexe 6 Gestion des déchets de type HA et MA-VL aux États-Unis d'Amérique

6.1 Contexte national

En 2018, les États-Unis d'Amérique comptait 327 millions d'habitants avec un PIB évalué à 17 410 milliards d'euros.

6.1.1 Politique énergétique

Les États-Unis d'Amérique sont le premier producteur mondial d'électricité nucléaire (807 TWh en 2018, soit 19 % de la production nationale d'électricité) et disposent de 98 réacteurs en fonctionnement. Deux réacteurs sont actuellement en construction sur le site de Vogtle, avec une connexion au réseau prévue en 2021.

La politique énergétique américaine est fortement influencée par les conditions économiques. Le coût bas des énergies fossiles ne favorise pas le déploiement à court terme de nouvelles capacités de production d'électricité d'origine nucléaire malgré l'existence de nombreux projets. Plusieurs installations s'engagent vers une mise à l'arrêt définitif. Si le respect des engagements pris dans le cadre du Clean Power Act de l'US EPA constituait un facteur positif pour l'industrie nucléaire, la remise en cause de ces engagements par la Maison Blanche ne favorise pas, également, le déploiement de nouvelles capacités (124).

Depuis 1977, les États-Unis d'Amérique ne procèdent plus au recyclage du combustible usé issu des réacteurs nucléaires civils. Le combustible usé est donc entreposé en piscine ou à sec à proximité des installations. Entre 1966 et 1972, une installation a procédé au recyclage de 640 tonnes de combustibles usés provenant pour partie d'installations commerciales.

6.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

Aux États-Unis d'Amérique, les acteurs de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (125) (126) :

Les exploitants de centrales nucléaires et d'installations générant des déchets radioactifs (titulaires d'une autorisation de fonctionnement) sont responsables de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs.

- La **Nuclear regulatory commission** (NRC), est une agence indépendante qui régule les activités nucléaires civiles, en particulier les réacteurs électronucléaires et les installations du cycle du combustible. La NRC est ainsi l'autorité responsable des installations de déchets radioactifs, y compris des entreposages de combustibles usés.
- Le **Department of energy** (DOE) est responsable du développement de l'énergie nucléaire, du programme d'armes nucléaires et de la non-prolifération des matières fissiles. Le DOE exerce le rôle d'autorité sur ses installations et ses activités, assure la gestion des déchets radioactifs (y compris le combustible usé des réacteurs de la défense et les déchets issus du retraitement de ce combustible) et pilote la réhabilitation de ses sites.
- L'**Environment protection agency** (EPA) établit les standards de protection de l'environnement contre les matières dangereuses, y compris certaines matières radioactives. L'EPA est l'autorité qui établit les standards de remédiation des anciennes mines d'uranium et des sites contaminés et les standards de radioprotection de l'environnement applicables à la gestion et au stockage des combustibles usés, des déchets de haute activité et des déchets transuraniens (TRU).
- Le Nuclear waste policy act (127) (NPWA) de 1982 établit la responsabilité de l'État fédéral en matière de stockage des déchets de haute activité (HLW) et du combustible usé. Dans le cadre établi par le NPWA, le DOE est responsable du développement de capacités de stockage pour les déchets de haute

activité (HLW) et le combustible usé, l'EPA est responsable de la définition des standards de protection de l'environnement applicable aux stockages et la NRC doit développer le cadre réglementaire permettant le respect des standards élaborés par l'EPA. Les principaux textes réglementaires associés figurent dans les sections 10 (énergie) et 40 (protection de l'environnement) du Code of federal regulations (CFR) (128).

6.2 Sources et types de déchets

Les déchets radioactifs et matériaux liés à l'exploitation et au traitement du minerai d'uranium sont produits en majorité par l'industrie nucléaire, le DOE et le secteur de la recherche.

La catégorisation des déchets radioactifs s'appuie sur leur potentiel de danger (activité) et leur origine.

Les déchets de faible activité (low level waste, LLW) sont regroupés en 4 catégories en fonction de leur activité (A, B, C et GTCC) ; les déchets de faible activité avec une activité supérieure à ceux de la classe C font l'objet de la 4^{ème} catégorie dite « greater than class C » (GTCC).

Les déchets de haute activité (high level waste, HLW) regroupent les matériaux issus en particulier du retraitement du combustible usé, y compris sous forme liquide.

Les déchets transuraniens (TRU) correspondent à des matériaux avec des éléments de numéro atomique supérieur à 92 (le neptunium, le plutonium, l'américium et le curium), et dont l'activité massique est supérieure à 3 700 Bq/g.

Fin 2016, l'industrie nucléaire américaine a produit 77 900 tonnes de métal lourd (tML) de combustible usé, avec 2 454 t de métal lourd produit par le gouvernement (DOE), 1 042 kg de métal lourd produit par la recherche et 79 kg de métal lourd produit par les autres secteurs.

6.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

6.3.1 Solutions de gestion actuelle

Les États-Unis d'Amérique comptent 172 installations d'entreposage de combustibles usés réparties sur le territoire, dont 132 sur les sites abritant ou ayant abrité des réacteurs nucléaires. Le pays ne dispose pas d'installation de stockage pour les déchets GTCC, HLW et pour le combustible usé.

Les États-Unis d'Amérique disposent de plusieurs installations de stockage pour les déchets LLW et TRU, dont le tableau annexe 6.3-1 ci-dessous en donne un aperçu (non exhaustif).

Tableau Annexe 6.3-1 Installations de stockage pour les déchets de faible activité et transuraniens (respectivement LLW et TRU)

Gestionnaire	Installation	Type de déchets	Nombre	Volume de déchets
DOE	Waste isolation pilot plant (WIPP) Stockage géologique (Nouveau Mexique)	TRU	1	91 000 m ³
	Larges boreholes ⁸⁴ (Nevada)	TRU	1	200 m ³
	Surface	LLW	18	1,7 10 ⁷ m ³

⁸⁴ Il s'agit d'un site d'essai comprenant 13 puits d'un diamètre de 3 à 3,6 mètres et de faible profondeur (36 mètres), dans lesquels sont entreposés des déchets radioactifs dans la partie basse du puit (jusqu'à 21 mètres de la surface) (129).

Gestionnaire	Installation	Type de déchets	Nombre	Volume de déchets
Privé	Stockage LLW (A, B et C) en fonctionnement	LLW	4	4,84 10 ⁶ m ³
	Stockage LLW (A, B et C) sous surveillance	LLW	4	4,38 10 ⁵ m ³

Les déchets TRU liés aux activités de défense sont stockés au Waste isolation pilot plant (WIPP). Il s'agit d'une installation de stockage géologique en formation saline à 650 m de profondeur située au Nouveau-Mexique exploitée depuis 1999 par le DOE. La construction du WIPP est estimée à environ 2 milliards d'US\$ (environ 1,8 milliards d'euros) pour une capacité d'environ 175 000 m³. Le fonctionnement du WIPP a été suspendue près de 3 ans suite à un accident intervenu entre février 2014 et janvier 2017. Fin février 2017, 91 000 m³ de déchets étaient stockés au WIPP.

On compte 4 installations de stockage pour déchets LLW actuellement en fonctionnement pour les déchets LLW : Barnwell (classe A, B et C), Clive (classe A), Richland (classe A, B et C) et Andrews (classe A, B et C).

6.3.2 Solution de gestion définitive envisagée

Le site de Yucca Mountain, situé dans le Nevada, a été sélectionné pour accueillir un stockage géologique pour des déchets radioactifs et du combustible usé en 1986. Ce choix s'appuyait sur la base des caractéristiques géologiques du site, du coût estimé du projet à cet emplacement et de l'impact socioéconomique jugé positif. En 2002, à l'issue de près de 20 années d'études et de recherche, le Président George Walker Bush a approuvé puis ratifié la sélection du site sur recommandation du Secrétaire à l'Énergie malgré l'opposition du gouverneur du Nevada.

En 2008, le DOE a déposé auprès de la NRC une demande d'autorisation de création d'un stockage géologique pour du combustible usé et des déchets HLW sur le site de Yucca Mountain. Toutefois, en 2010, l'administration Obama, en désaccord avec le projet, y a mis fin (du moins temporairement), entraînant le retrait par le DOE de sa demande d'autorisation. Le DOE a alors mis en place une Blue Ribbon commission (130) sur l'avenir de la filière nucléaire américaine. Sur la base du rapport de cette commission, le DOE a élaboré une « Strategy for the management and disposal of used nuclear fuel and high-level waste » (131). Le DOE recommande un processus de sélection de sites s'appuyant en premier lieu sur le consentement des localités à accueillir les installations (entreposage centralisé du combustible usé, installation pilote pour le stockage géologique, etc.). La mise en place d'une agence pour la gestion des déchets radioactifs est également recommandée. L'horizon 2050 est évoqué pour le démarrage du fonctionnement d'une installation de stockage géologique.

Le rapport de la Blue Ribbon commission, repris par le DOE, précise l'importance du stockage géologique indépendamment de tout choix en matière d'énergie nucléaire :

« Deep geologic disposal capacity is an essential component of a comprehensive nuclear waste management system for the simple reason that very long-term isolation from the environment is the only responsible way to manage nuclear materials with a low probability of re-use, including defense and commercial reprocessing wastes and many forms of spent fuel currently in government hands. The conclusion that disposal is needed and that deep geologic disposal is the scientifically preferred approach has been reached by every expert panel that has looked at the issue and by every other country that is pursuing a nuclear waste management program. Some commenters have urged the prompt adoption of recycling of spent fuel as a response to the waste disposal challenge, as well as a means to extend fuel supply. It is the Commission's view that it would be premature for the United States to commit, as a matter of policy, to "closing" the nuclear fuel cycle given the large uncertainties that exist about the merits and commercial viability of different fuel cycles and technology options. Future evaluations of potential alternative fuel cycles must account for linkages among all elements of the fuel cycle (including waste transportation, storage, and disposal) and for broader safety, security, and non-proliferation concerns. Moreover, all spent fuel reprocessing or recycle options generate waste streams that require

a permanent disposal solution. In any event, we believe permanent disposal will very likely also be needed to safely manage at least some portion of the commercial spent fuel inventory even if a closed fuel cycle were adopted ». En d'autres termes : le stockage géologique est une composante essentielle du système américain de gestion des déchets radioactifs, quelles que soient les évolutions de la politique énergétique américaine, car c'est la seule option responsable sur le long terme permettant une isolation des déchets de haute activité.

6.4 Modalités de financement

Le Nuclear Waste Policy Act de 1982 a imposé aux exploitants d'avoir un accord contractuel avec le DOE pour le stockage du combustible usé et des déchets de haute activité (HLW). Cet accord stipule un versement équivalent à 0,001 US\$ par kWh (0,0009 euro par kWh) produit au Nuclear waste fund (NWF), soit environ de 750 à 800 millions d'US\$ par an (de 676 à 721 millions d'euros) afin de couvrir les coûts liés à la gestion de long terme de ces matières. Ce versement a été suspendu en mai 2014 en conformité avec une décision de justice. Le DOE devait en effet mettre une solution de stockage à disposition ou assumer la gestion du combustible usé à compter du 31 janvier 1998. Les exploitants ont engagé des actions en justice à l'encontre du gouvernement fédéral et le montant des dédommagements versés se chiffre à 6,9 milliards d'US\$ (soit 6,17 milliards d'euros) selon le DOE et pourrait atteindre 34,1 milliards d'US\$ (soit 30,48 milliards d'euros).

Les exploitants ont versé 21,2 milliards d'US\$ (soit 18,95 milliards d'euros) au Nuclear waste fund qui rapporte environ 1 milliard d'US\$ d'intérêts par an (soit 890 millions d'euros). Fin 2016, 7 milliards d'US\$ (soit 6,26 milliards d'euros) ont été dépensés par le DOE pour le projet Yucca Mountain et le fond disposait d'environ 28 milliards d'US\$ (environ 25 milliards d'euros).

Selon le plan du DOE, le site d'une capacité supérieure à 70 000 tonnes pouvait être opérationnel en 2021 pour un coût (transport, construction, fonctionnement, fermeture en 2133) de 96 milliards d'US\$₂₀₀₇ (soit 85,81 milliards d'euros).

Une note du Secrétaire d'État à l'énergie de 2013 portant sur l'adéquation des frais payés par les exploitants et de l'estimation du coût du stockage fait état des chiffres suivants :

- sélection du site : 3,260 milliards d'US\$ (soit 2,910 milliards d'euros) ;
- caractérisation du site et demande d'autorisation de création : 8,514 milliards d'US\$ (soit 7,610 milliards d'euros) ;
- construction : 7,819 milliards d'US\$ (soit 6,990 milliards d'euros);
- transport (infrastructure et équipement) : 1,544 milliards d'US\$ (soit 1,380 milliards d'euros).

Le même document indique appuyer ses évaluations économiques sur la circulaire Guidelines and discount rates for benefit-cost analysis of federal programs (132).

Annexe 7 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Finlande

7.1 Contexte national

En 2018, la Finlande comptait 5,5 millions d'habitants avec un PIB d'environ 233 milliards d'euros.

7.1.1 Politique énergétique

La Finlande compte 4 réacteurs nucléaires en fonctionnement qui produisent environ 30 % de son électricité (23 TWh en 2016). Un réacteur EPR est en construction à Olkiluoto et un réacteur est en projet à Hanhikivi. La politique énergétique finlandaise vise à supprimer le charbon de son mix énergétique d'ici à 2029. La réglementation finlandaise prévoit depuis 1987 le stockage en couche géologique profonde comme solution de gestion définitive pour le combustible utilisé.

7.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Finlande, les acteurs de la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (133) (134) :

La Finlande compte 2 exploitants, TVO et Fortum, qui sont responsables de la gestion des déchets radioactifs qu'ils produisent selon le principe du pollueur-payeur. En cas de défaut d'un exploitant, la responsabilité de la gestion des déchets radioactifs échoit à l'état Finlandais.

Le stockage final des déchets de haute activité est géré par Posiva Oy, une joint-venture entre TVO (60 %) et Fortum (40 %), créée en 1995.

Le **Ministère en charge du commerce et de l'industrie** assure la supervision de fonctionnement des installations nucléaires et de la gestion des déchets radioactifs.

L'**Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection** (STUK), placée sous la responsabilité du gouvernement, assure la régulation et la surveillance des installations nucléaires. Le STUK produit un avis sur les demandes d'autorisations élaborées par les exploitants.

Le **Nuclear energy act** (1987) précise que tout déchet nucléaire produit en Finlande doit être géré en Finlande. Un déchet nucléaire est un déchet radioactif produit dans le cadre de la production d'électricité d'origine nucléaire. La classification finlandaise des déchets radioactifs distingue ainsi les déchets nucléaires et les déchets radioactifs non nucléaires.

En accord avec le Nuclear energy act (1987), la construction d'une installation nucléaire requiert au préalable une décision de principe du Gouvernement (decision-in-principle) qui traduit que le projet contribue au « bien-être » de la société finlandaise.

7.2 Sources, types et quantités de déchets

Le *Nuclear energy act* distingue différentes catégories de déchets radioactifs :

- les déchets de très faible activité (very low level waste, VLLW) : déchets nucléaires dont l'activité massique moyenne n'excède pas 100 kBq/kg et dont l'activité totale n'excède pas 1 TBq (10 GBq en émetteurs alpha) ;
- les déchets de faible activité (low level waste, LLW) : déchets nucléaires pouvant être manipulés sans condition particulière. L'activité massique n'excède pas 1 MBq/kg ;

- les déchets de moyenne activité (intermediate level waste, ILW) : déchets nucléaires dont la manipulation requiert la mise en place de parades spécifiques (radioprotection). L'activité massique varie de 1 MBq/kg à 10 GBq/kg.
- le combustible usé : le combustible usé est classé comme déchet nucléaire de haute activité. Le stockage définitif du combustible usé est la seule option de gestion envisagée.

Par ailleurs, la réglementation élaborée par STUK distingue les déchets à vie courte (activité massique dans 500 ans d'un colis supérieure à 100 MBq/kg et activité massique moyenne d'un emplacement de stockage inférieure à 10 MBq/kg) et les déchets à vie longue (activité massique dans 500 ans de chaque colis inférieur à 100 MBq/kg ou activité massique moyenne d'un emplacement de stockage supérieure à 10 MBq/kg).

7.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

7.3.1 Solutions de gestion actuelle

Les exploitants, TVO et Fortum, sont responsables de la mise en colis et du stockage des déchets de faible et de moyenne activité qu'ils produisent, chacun exploite une installation de stockage dédiée à proximité des centrales, et de l'entreposage du combustible usé réalisé en piscine sur site. Posiva est responsable de la conception et de la construction d'une installation de stockage du combustible usé. Cette installation recevra le combustible des 4 réacteurs en fonctionnement et du réacteur en construction (Olkiluoto 3). En pratique, le combustible usé séjournera de 30 ans à 50 ans en piscine avant transfert dans l'installation de stockage géologique.

La centrale d'Olkiluoto exploite sur son site depuis 1992 un stockage situé entre 60 et 100 mètres de profondeur pour le stockage des déchets de faible et de moyenne activité. Le stockage est constitué de 2 silos pour séparer les déchets de faible activité et ceux de moyenne activité et d'installations auxiliaires. La capacité de stockage devrait être accrue vers 2030.

La centrale de Loviisa exploite sur son site depuis 1998 un stockage situé à environ 110 mètres de profondeur pour le stockage des déchets de faible et de moyenne activité. Le stockage est constitué de 3 tunnels et d'un espace séparé. La capacité de stockage devrait être accrue vers 2030.

7.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

La seule option de gestion définitive envisagée en Finlande pour le combustible usé considéré comme déchet nucléaire de haute activité est le stockage en formation géologique profonde.

La sélection d'un site pour accueillir l'installation a débuté en 2000. La démarche a abouti au lancement de la construction d'une installation souterraine (underground rock characterisation facility) à Olkiluoto entre 2004 et 2012. L'installation compte environ 5 km de galerie à une profondeur de 455 mètres. Le gouvernement a délivré à Posiva en novembre 2015 une autorisation de construction d'une installation de conditionnement et de stockage pouvant accueillir 6 500 tonnes de combustible usé sur le site, correspondant à 50 années de fonctionnement pour les réacteurs de Loviisa 1 et 2 et de 60 années pour ceux de Olkiluoto 1, 2 et 3. Les travaux ont débuté en 2016. Le combustible usé sera placé dans des conteneurs dont l'enveloppe externe est en cuivre. L'espace entre le conteneur et l'alvéole de stockage sera comblé avec de la bentonite qui est un type d'argile. Le fonctionnement de l'installation doit débiter à l'horizon de 2023, pour une fermeture prévue en 2120.

7.3.3 Alternatives envisagées

Aucune alternative n'est envisagée par la Finlande.

7.4 Modalités de financement

Le coût total des activités liées à la recherche d'un site, la construction de l'installation de caractérisation de la roche, la construction de l'installation de stockage, son fonctionnement et les travaux de fermeture et de démantèlement est estimé à environ 3 milliards d'euros.

Les exploitants TVO et Fortum alimentent un fond créé en 1987 par le Nuclear energy act et placé sous l'autorité du Ministère en charge du Commerce et de l'Industrie. Ce fond vise à financer la gestion définitive des déchets nucléaires de haute activité. Le gouvernement fixe le montant annuel des provisions versées par les exploitants. Ce fond vise à financer le stockage géologique des déchets de haute activité et le démantèlement des installations.

Un document de Posiva datant de 2011 fournit les éléments chiffrés suivants :

- coût de construction : 710 millions d'euros ;
- coût de fonctionnement : 2 340 millions d'euros ;
- fermeture et démantèlement : 280 millions d'euros .

Soit un coût total de l'ordre de 3,3 milliards d'euros pour la gestion définitive du combustible usé.

Fin 2014, le fonds disposait de 2,38 milliards d'euros. En 2015, les exploitants ont versé 91 millions d'euros et le fonds a généré un rendement de 25,5 millions d'euros. L'État finlandais considère que les provisions actuelles sont suffisantes pour couvrir l'ensemble des charges à long terme.

Annexe 8 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Japon

8.1 Contexte national

En 2018, le Japon comptait 126 millions d'habitants avec un PIB d'environ 4 212 milliards d'euros.

8.1.1 Politique énergétique

Au début des années 1970, le Japon s'est lancé dans un important programme de développement de l'énergie nucléaire, portant tout à la fois sur l'essor des réacteurs nucléaires ainsi que sur l'ensemble du cycle du combustible. En 1974, le Japon voit la mise en service de son premier réacteur : Takahama I. La construction de nouveaux réacteurs s'est ensuite poursuivie pour représenter en 2011 près de 30 % de la production électrique du pays, avec 52 réacteurs opérationnels. Cependant, la survenue de l'accident de Fukushima, le 11 mars 2011, a très largement remis en question la place du nucléaire dans la politique énergétique nipponne. En effet, dès octobre 2011, le gouvernement japonais a cherché à réduire considérablement le rôle de l'énergie nucléaire en proposant un nouveau plan énergétique fondé sur des énergies « vertes » et indépendantes du nucléaire. En juin 2015, la nouvelle stratégie énergétique du pays est adoptée. Cette stratégie prévoit qu'à l'horizon 2030, la part du nucléaire représenterait entre 20 % et 22 % de la production d'électricité du pays, et la part des énergies renouvelables serait quant à elle de 22 % à 24 %. Pour répondre à cette stratégie, des réacteurs nucléaires ont progressivement redémarré à partir de 2015 pour, en février 2019, être au nombre de 8 réacteurs en fonctionnement, produisant environ 6 % de l'électricité du pays. La dernière stratégie énergétique, approuvée en juillet 2018, continue de promouvoir la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique d'ici 2030. Cela implique la poursuite des remises en service des réacteurs nucléaires encore à l'arrêt à ce jour.

De 1969 à 2001, le retraitement du combustible usé a été en grande partie opéré à La Hague et à Sellafield. Les déchets vitrifiés issus de ce retraitement ont été retournés au Japon pour y être gérés. Une usine de retraitement, exploitée par JNFL et localisée à Rokkasho-Mura devait démarrer en 2008 puis a été retardée en raison de défauts techniques de vitrification. Le démarrage est prévu, selon JNFL, dans le courant de l'année 2021.

8.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

Au Japon, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets radioactifs se répartissent comme suit (135) (136) :

- **Les organismes gouvernementaux** sont au nombre de quatre. La **Commission de l'énergie atomique** (AEC), placée sous l'autorité du premier ministre, s'occupe de définir la stratégie de développement nucléaire du pays et est en charge du budget des activités de R&D associées. Le **Ministère de l'éducation, de la culture, des sports et des sciences et technologies** (MEXT) coordonne les travaux scientifiques et technologiques associés à l'énergie nucléaire et notamment ceux dédiés aux techniques de retraitement du combustible usé. Le **Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie** (METI) est l'interlocuteur principal des producteurs d'électricité. Il assure l'application industrielle des développements de R&D supervisés par le MEXT. Enfin, l'**Agence des ressources naturelles et de l'énergie** (ANRE) est chargée d'élaborer et de planifier la stratégie énergétique du pays. Elle est, à ce titre, la tutelle d'un certain nombre d'organisme comme NUMO.
- **L'autorité de sûreté nucléaire, nommée Nuclear regulation authority** (NRA), a été créée en septembre 2012, à la suite de l'accident de Fukushima. La NRA est un bureau indépendant du ministère de l'Environnement (MOE). Son président ainsi que ses commissaires sont nommés par le premier ministre. Globalement, la NRA a pour mission de « protéger le grand public et l'environnement par le biais d'une réglementation rigoureuse et d'activités nucléaires fiables ».

- **Les organismes de recherche** mènent différents travaux de R&D dans la perspective d'un stockage géologique profond. Parmi ces organismes, on retrouve la **Japan atomic energy agency (JAEA)** qui effectue diverses recherches en matière de gestion des déchets radioactifs et du cycle du combustible. Le **Radioactive waste management funding and research center (RWMC)** est placé sous la tutelle du METI. Il conduit des études de R&D dédiées aux techniques de stockage des déchets radioactifs et du combustible usé.
- Au Japon, il existe **plusieurs organismes gestionnaires des déchets**. Chaque type de déchet est en effet confié à un organisme spécifique qui en assure la gestion. Ainsi, la compagnie **Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL)**, créée par les différentes compagnies d'électricité, est en charge de la réalisation et du fonctionnement des installations du cycle du combustible, localisées sur le site de Rokkasho-mura. Sur ce même site, elle exploite également un centre de stockage des déchets de faible activité. L'organisme semi public **Nuclear waste management organisation (NUMO)** a quant à lui été créé en 2000 et est placé sous la tutelle du METI. Sa mission consiste à identifier un site capable d'abriter un stockage géologique et d'en réaliser sa construction.
- **Les électriciens**, sont au nombre de 10 compagnies électriques dont 9 compagnies régionales (TEPCO, KEPCO, Kyushu Electric Power Company, Tohoku Electric Power Company, Chubu Electric Power Company, Shikoku Electric Power Company, Hokkaido Electric Power Company, Chugoku Electric Power Company et Hokuriku Electric Power Company) et une filiale : JAPCO.

La politique d'utilisation pacifique du nucléaire au Japon est régie par plusieurs textes fondamentaux, à commencer par la loi sur l'énergie atomique (Atomic energy basic act) (137), promulguée en 1955, et la loi sur le fonctionnement des réacteurs (Reactor regulation act) (138), adoptée en 1957. Ces textes limitent de manière très spécifique la recherche, le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques et donnent *la priorité* à la sécurité et à la sûreté des installations nucléaires. À noter que suite à l'accident de Fukushima, la loi Reactor regulation act a été révisée en 2012 pour prendre en compte la survenue des catastrophes naturelles ainsi que les possibles actes de malveillance liés aux activités terroristes notamment. Les aspects réglementaires relatifs à la gestion des déchets radioactifs se sont quant à eux développés lors des vingt dernières années. En 2000, une loi sur le stockage des déchets radioactifs de haute activité (Final disposal act) a ainsi été publiée pour fixer les conditions de réalisation du stockage dédié aux déchets vitrifiés. Cette loi est à l'origine de la création du Nuclear waste management organisation. En 2007, cette loi a été amendée pour prendre en compte les déchets transuraniens dans le projet de stockage, en plus des déchets vitrifiés.

8.2 Sources, types et quantités de déchets

Au Japon, la majeure partie des déchets radioactifs provient de l'industrie électronucléaire. Ces déchets sont répartis en deux catégories principales :

- les déchets de faible activité (low level waste, LLW) subdivisé en plusieurs catégories :
 - ✓ les déchets de très faible activité provenant essentiellement du démantèlement ;
 - ✓ les déchets de faible activité comprenant des métaux ou liquides conditionnés en fûts de béton ;
 - ✓ les déchets de plus haute activité comportant une plus grande quantité d'émetteurs bêta et gamma ;
 - ✓ les déchets transuraniens (TRU) comportant une quantité relativement importante d'émetteurs alpha ;
- les déchets de haute activité (high level waste, HLW) qui comprennent les déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible usé.

Fin 2017, environ 18 398 tonnes de combustible usé étaient stockées sur les différents sites des centrales, en attendant leur retraitement. De même, 2 448 colis de déchets vitrifiés ainsi que 373 m³ de déchets liquides de haute activité sont stockés actuellement sur des sites d'entreposage temporaire. Enfin, au sein des différentes centrales, environ 140 000 m³ de déchets de faible activité sont entreposés.

À noter qu'à la suite de l'accident de Fukushima, de nombreux réacteurs ont été arrêtés de manière définitive. Le démantèlement de ces réacteurs, ainsi que la décontamination issue de l'accident vont produire d'importantes quantités de déchets radioactifs dans les années à venir.

8.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

Pour les deux catégories de déchets radioactifs mentionnées ci-dessus, le Japon y associe deux types d'installation de stockage :

- une installation en surface, ou semi-enterrée, ou à faible profondeur (100 mètres) pour les déchets de faible activité ;
- une installation en milieu géologique profond pour les déchets de haute activité.

8.3.1 Solutions de gestion actuelle

Au Japon, chaque centrale entrepose des déchets radioactifs de faible et moyenne activité, ainsi que du combustible usé sur son site de production, en attendant leur stockage et leur prise en charge dans des installations définitives.

En ce qui concerne les déchets de faible activité provenant des centrales nucléaires, il existe une installation de stockage définitif mise en service en décembre 1992 dont le fonctionnement est assuré par JNFL. Cette installation de stockage est localisée à Rokkasho-Mura, à proximité de la centrale d'Higashidori, au nord de l'île d'Honshu. Le concept de cette installation est basé sur la construction d'alvéoles enterrées à quelques dizaines de mètres sous le niveau du sol et qui, une fois remplies, sont bétonnées et tapissées d'un couvert végétal. La capacité totale du site est aujourd'hui de 80 000 m³ et peut, à terme, atteindre 600 000 m³. En octobre 2017, l'installation stockait 52 000 m³ de déchets de faible activité.

En ce qui concerne les déchets vitrifiés (déchets de haute activité), issus du retraitement du combustible usé opéré à La Hague et à Sellafield, ils sont entreposés sur le site de Rokkasho-Mura pour une durée de trente à cinquante ans. Une fois refroidis, il est prévu que ces déchets soient déposés en stockage géologique profond.

À noter qu'un stockage de déchets de « plus haute activité » comportant une quantité plus importante d'émetteurs bêta et gamma est en cours d'étude. Le concept serait de stocker ces déchets entre 50 et 100 mètres de profondeur, toujours sur le site de Rokkasho-Mura.

8.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute activité

Le programme de R&D dédié à la gestion des déchets de haute activité a débuté au Japon dès 1976 et a abouti, en 2000, à la publication du Final disposal act (136). Cette loi impose le stockage géologique profond comme solution de gestion définitive des déchets vitrifiés et, suite à un amendement de 2007, des déchets transuraniens. Pour mettre en œuvre un tel stockage, le NUMO est créé et lance dès 2002 un appel à candidature des municipalités favorables pour abriter un stockage géologique de déchets radioactifs. Près de 3 200 communes ont alors été sollicitées. L'idée était d'identifier d'ici 2012 les sites adaptés pour abriter un stockage géologique profond, puis mener des investigations spécifiques pour *in fine* retenir un site unique d'ici 2030 ; la mise en service du stockage étant initialement prévue d'ici 2040. Cependant, l'appel à candidature lancé par NUMO n'a reçu aucune réponse. Dans un tel contexte, le gouvernement japonais a décidé de s'impliquer davantage dans la gestion définitive des déchets de haute activité. Le Final disposal act a ainsi été revu en mai 2015 pour tenter de répondre à certaines préoccupations de la population japonaise. Le concept de stockage géologique se devra désormais d'être réversible, et les déchets devront être récupérables, pour permettre aux générations futures d'opter à l'avenir pour une autre solution de stockage qui s'avérerait plus judicieuse. En parallèle, afin d'engager

le plus en amont possible le dialogue avec le territoire susceptible d'abriter le stockage géologique, il a été décidé d'établir une cartographie nationale des zones adaptées à recevoir un tel stockage. Coordonné par l'ANRE (METI), un groupe d'experts indépendants a été créé pour définir cette cartographie qui a été publiée sur le site du NUMO en juillet 2017. La carte identifie :

- les régions susceptibles de répondre aux exigences géologiques requises pour l'hébergement d'un stockage profond (représentant au total les deux tiers du territoire japonais) ;
- les régions inadaptées à un tel stockage en raison de leur proximité avec des volcans ou des failles actives.

À noter que les régions dotées de ressources minérales potentiellement exploitables dans le futur ont été considérées comme régions inadaptées. De même, les préfectures de Fukushima et d'Aomori (site de Rokkasho-Mura) ont été exclues du processus de sélection afin de leur éviter un « fardeau » supplémentaire. À l'heure actuelle, NUMO prévoit une première sélection de sites potentiels d'ici 2025 et une mise en service du stockage d'ici 2035.

Dans cette installation, il est prévu de stocker plus de 40 000 conteneurs de déchets vitrifiés pendant au minimum 40 ans. La durée de fonctionnement du stockage est prévue pour 60 ans et devra être suivie d'une période de surveillance de 300 ans. En ce qui concerne les aspects techniques du stockage, le milieu retenu pour sa construction sera constitué soit d'une couche sédimentaire, soit d'une couche cristalline, située entre 100 et 1 000 mètres de profondeur. Pour mener à bien ses travaux de recherche, JAEA possède deux laboratoires souterrains. Le laboratoire souterrain Horonobe, sur l'île d'Hokkaido, est situé à 500 mètres de profondeur et permet d'étudier les roches sédimentaires. Le laboratoire souterrain de Mizunami (MIU) est situé au centre de l'île d'Honshu à 1 000 mètres de profondeur dans du granit.

À noter que NUMO travaille également sur les concepts de réversibilité du stockage et de récupérabilité des déchets. Le concept « CARE » (Caverne Retrievable) est en cours de réflexion. Il comprendrait deux étapes distinctes :

- la mise en place de galeries ventilées avec stockage des déchets dans des conteneurs blindés accessibles pendant 300 ans ;
- le remblayage et scellement des galeries si aucune autre solution de stockage plus adaptée n'a été trouvée durant cette période.

8.4 Modalités de financement

Au Japon, le mode de financement de la gestion des déchets radioactifs varie en fonction de la nature du stockage et des déchets. Pour ce qui concerne le stockage géologique profond, ses modalités de financement sont fixées par la loi sur le versement et la gestion de fonds de retraitement des combustibles usés (136). Un fonds de réserve a été créé à cet effet et est géré par le RWMC. Ce fonds est alimenté par les producteurs d'électricité qui, chaque année, verse à NUMO une somme correspondant au nombre de conteneurs en verre (calculé sur la base du combustible utilisé dans l'année) que NUMO devra stocker par la suite. Cette somme correspond à environ 0,2 yen/kWh (soit 0,0017 euros/kWh) et est versée par NUMO au fonds géré par le RWMC. En 2015, le fonds était estimé à une valeur de 1 000 milliards de yen (soit 8,37 milliards d'euros). Le projet de stockage géologique est estimé quant à lui à 3 000 milliards de yen (soit 25,11 milliards d'euros).

Annexe 9 Gestion des déchets de type HA et MA-VL aux Pays-Bas

9.1 Contexte national

En 2018, les Pays-Bas comptaient 17 millions d'habitants avec un PIB de l'ordre 774 milliards d'euros.

9.1.1 Politique énergétique

Les Pays-Bas disposent d'un réacteur nucléaire à Borssele qui produit 3,5 % de l'électricité, soit 4 TWh en 2015. La centrale nucléaire de Doodewaard a été mise à l'arrêt définitif en 1997. Le combustible utilisé de cette centrale a été retraité à Sellafield, celui de Borssele à La Hague. Les Pays-Bas disposent d'une installation d'enrichissement de l'uranium à Almelo exploitée par Urenco.

La majorité de l'électricité produite aux Pays-Bas provient du gaz et du charbon. Le pays s'est engagé dans une politique énergétique favorisant la production décarbonée d'électricité et accordant une place importante à l'éolien offshore en particulier. Plusieurs projets de nouveaux réacteurs ont été évoqués dans les années 2000 et 2010, mais actuellement aucune nouvelle construction n'est à l'ordre du jour.

Les Pays-Bas disposent de réacteurs de recherche dont le High flux reactor (HFR) à Petten qui produit des isotopes employés à des fins médicales (60 % du marché européen). Le High flux reactor devrait être remplacé à terme par le réacteur Pallas dont la construction a été confié à la société Invap.

9.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

La loi sur l'énergie nucléaire de 1963 fixe les règles d'utilisation des matériaux nucléaires. Un processus de révision a été engagé en 2006. Le Ministère des affaires économiques a la responsabilité de la politique énergétique, incluant la politique nucléaire. Les Pays-Bas ne disposent pas d'une loi spécifique sur la gestion des déchets radioactifs, ils disposent d'un décret sur la radioprotection et d'un décret sur les installations nucléaires, les matières fissiles et les minerais.

Dans les années 1970, les Pays-Bas ont choisi une politique de retraitement du combustible utilisé des réacteurs de Doodewaard et de Borssele. En 1984, le gouvernement a opté pour une stratégie d'entreposage de longue durée (100 ans) de tous les déchets radioactifs accompagnée d'un programme de recherche visant à définir la meilleure stratégie pour la gestion ultime de ces déchets. Cette stratégie a été validée par le Parlement.

Aux Pays-Bas, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets radioactifs sont les suivants (139) (140) (141) :

- l'**organisme en charge de la gestion des déchets radioactifs Covra**, créé en 1982 et basé à Borssele, est une entreprise publique ;
- l'**Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ANVS)** a été créée en 2014 et est placée sous la responsabilité du Ministère en charge des infrastructures et de l'environnement. Elle est devenue complètement indépendante le 1er août 2017 ;
- le **Nuclear research and consultancy group (NRG)** réalise des travaux de recherche dans le domaine nucléaire (réacteur à haute température, transmutation des actinides et développement de combustibles MOX). NRG exploite le High flux reactor de Petten.

9.2 Sources, types et quantités de déchets

L'inventaire néerlandais des déchets radioactifs distingue le combustible utilisé, les déchets de haute activité (high level waste, HLW), les déchets de moyenne activité (intermediate level waste, ILW), les déchets de faible activité (low level waste, LLW) et les déchets à radioactivité naturelle renforcée (NORM).

Au 31 décembre 2016, les quantités suivantes de déchets étaient entreposées dans les installations de Covra :

- déchets de faible et moyenne activité (LLW) : 11 109 m³ ;
- déchets de haute activité (hors combustible usé - HLW) : 91 m³,
- déchets à radioactivité naturelle renforcée (NORM) : 20 622 m³.

Les combustibles usés sont entreposés à Bortssele, Petten et Delft.

9.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

9.3.1 Solutions de gestion actuelle

Le tableau ci-dessous indique les lieux d'entreposage des déchets radioactifs néerlandais.

Tableau Annexe 9.3-1 Lieux d'entreposage des déchets radioactifs

Lieu	Installation	Commentaires
Nieuwdorp	Entreposage à sec de combustibles usés	Installation HABOG ⁸⁵ exploitée par Covra
	Entreposage à sec de déchets de haute activité	Installation HABOG exploitée par Covra
	Entreposage à sec de déchets de faible et moyenne activité	Installations AVG et LOG exploitées par Covra
	Entreposage à sec de déchets NORM	Installation COG exploitée par Covra
	Entreposage à sec de U3O8 appauvri	Installations VOG et VOG-2 exploitées par Covra
Borssele	Entreposage en piscine du combustible usé	Refroidissement en centrale du combustible usé avant transport en France pour retraitement
Petten	Entreposage en piscine du combustible usé	Entreposage du combustible usé avant transport à HABOG
	Entreposage à sec de combustible usé (héritage)	En attente de transport vers HABOG
	Entreposage à sec de déchets de haute activité	En attente de transfert à COVRA
Delft	Entreposage en piscine du combustible usé	En attente de transport vers HABOG
Nauerna et Rotterdam	Stockage de déchets NORM	Installations de stockage dédiées

9.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets radioactifs

Le gouvernement néerlandais, en application des décisions de 1984, s'oriente vers le stockage géologique, dans 100 ans, comme option de gestion définitive de l'ensemble des déchets radioactifs

⁸⁵ L'entreposage HABOG dispose de deux compartiments, l'un abritant les déchets de moyenne activité et le second les déchets de haute activité, dont l'inventaire est constitué des déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible usé et des autres déchets retournés par Sellafield et La Hague.

géré par Covra. La mise en place d'un tel projet devra s'appuyer sur un processus à plusieurs étapes réversibles et aboutir à une décision vers 2100 et un début de fonctionnement vers 2130.

9.3.3 Alternatives envisagées

La trajectoire décrite ci-dessus est flexible et le gouvernement pourrait opter pour une solution alternative si elle venait à se présenter dans le siècle à venir (comme le stockage international pour les déchets de haute activité, le stockage en surface pour les déchets de faible activité, etc.). Les Pays-Bas sont ainsi membres du réseau européen European repository development organisation (ERDO) qui étudie les solutions de stockage géologique partagé. Récemment, dans le cadre de ses activités à l'international sur le sujet, le gouvernement a décidé d'investiguer plus avant les conditions d'importations et d'exportations de déchets radioactifs.

9.4 Modalités de financement

Le programme de recherche sur la gestion à long terme des déchets radioactifs est piloté par Covra et financé par le gouvernement et l'industrie nucléaire. Le programme Opera disposait ainsi d'une enveloppe de 10 millions d'euros.

Le financement de la gestion des déchets est assuré suivant le principe du pollueur-payeur. La facturation des services de Covra couvre ainsi le coût associé au traitement, à l'entreposage et au stockage géologique des déchets radioactifs qui lui sont confiés. Par ailleurs, les producteurs ont financé la construction des installations HABOG et VOG-2.

Covra a estimé en 2016 que le coût de construction du stockage géologique serait de l'ordre de 2 milliards d'euros. Les provisions sont constituées d'ici à 2130 en s'appuyant sur un taux d'inflation de 2 % et un rendement du fonds de 4,3 %. Ces éléments sont révisés périodiquement.

Annexe 10 Gestion des déchets de type HA et MA-VL au Royaume-Uni

10.1 Contexte national

En 2018, Le Royaume-Uni comptait 65 millions d'habitants avec un PIB d'environ 2 424 milliards d'euros.

10.1.1 Politique énergétique

Le Royaume-Uni compte 15 réacteurs nucléaires (9,5 gigawatt électrique) qui produisent environ 20 % de l'électricité britannique (72 TWh en 2016). Tous sont exploités par EDF Energy. La politique énergétique visant à réduire les émissions à effet de serre, la place du nucléaire dans le mix énergétique s'est trouvée confortée au milieu des années 2000, se traduisant en particulier par le lancement du chantier Hinkley Point C (deux EPR) après octroi d'une licence par l'Office of nuclear regulation en novembre 2012.

Une usine de retraitement du combustible usé des réacteurs Magnox située à Sellafield a été exploitée de 1964 à 2018, traitant 9 331 tonnes de combustibles usés dont 60 % produites par les centrales britanniques.

Jusqu'en 1982, des déchets de faible et moyenne activité ont été déposés dans les fonds marins (fosses océanique). Le gouvernement britannique a signé en 1993 une convention internationale interdisant l'immersion de tout type de déchets radioactifs dans la mer.

10.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

Les principaux textes législatifs portant sur les installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs sont The energy act (2004 et 2013), Health and safety at work act (1974) et Nuclear installations act (1965) (142).

Au Royaume-Uni, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets radioactifs sont les suivants (143) (144) :

- **l'Office for nuclear regulation** (ONR) dont l'objet, les moyens et les fonctions sont établis par The energy act de 2013, est **l'autorité en charge de la sûreté nucléaire** (entre autres) ; l'autorisation de création d'une installation nucléaire est de la responsabilité de l'ONR. L'ONR est une agence du régulateur indépendant Health and safety executive (HSE) ;
- créé en 1982, Nirex (puis Nirex Limited) a pour responsabilité de travailler sur le stockage en tranchée des déchets de faible et moyenne activité à vie courte et sur le stockage en formation géologique des déchets de moyenne activité à vie longue. La création du Nirex et son objet a fait suite à un moratoire de 50 ans sur le stockage des déchets de haute activité ;
- fin 2001, le gouvernement britannique a annoncé la création d'une **autorité en charge de la gestion des passifs de l'industrie nucléaire civile**. Le 1^{er} avril 2005, le **National decommissioning authority** (NDA, instauré par The energy act de 2004) est ainsi devenu propriétaire de 11 sites abritant des réacteurs Magnox, les installations du cycle du combustible de BNFL, incluant le site de Sellafield (retraitement du combustible usé) et le centre de stockage pour les déchets de faible activité de Drigg (LLW repository) et les sites de Dounreay, Harwell et Winfrith (centres de recherche de United Kingdom atomic energy authority). Le NDA porte la responsabilité du démantèlement des installations nucléaires et de la gestion par stockage des déchets radioactifs ;
- le NDA a mis en place en 2007 le Radioactive waste management directorate (RWMD puis RWM Limited) pour développer dans un premier temps le concept de stockage géologique pour les déchets de haute et moyenne activité puis, par la suite, construire et exploiter cette installation. Les activités de Nirex Limited sur le stockage ont été reprises par le RWMD ;

- le **Committee on radioactive waste management (CoRWM)** a été créé en 2003 et **conseille le gouvernement** spécifiquement sur le stockage en couche géologique profonde et sur les options d'entreposage à long terme. Le comité est constitué de 12 membres aux profils variés ;
- la **Direction de l'énergie et du changement climatique (DECC)** valide dans le cas des nouveaux projets nucléaires **les éléments relatifs au financement** de la gestion des déchets radioactifs, du combustible usé et du démantèlement présenté par l'exploitant. Cette disposition vise en particulier à minimiser le risque de recours à des fonds publics.

10.2 Sources, types et quantités de déchets

La majorité des déchets radioactifs britanniques sont liés au développement historique de l'énergie nucléaire et à la production d'électricité nucléaire.

Selon la législation britannique, un déchet radioactif est un déchet contenant des radionucléides naturels ou artificiels dont la concentration excède les valeurs définies par la réglementation sur la base du rapport Radiation protection 122 de la Commission européenne (145). Cette réglementation distingue :

- les déchets de très faible activité (very low level waste, VLLW) sont une sous-catégorie des déchets de faible activité (low level waste, LLW) :
 - ✓ en cas de volume faible : ces déchets radioactifs peuvent être stockés de manière sûre dans une décharge conventionnelle, avec une activité pour 0,1 m³ de déchet n'excédant pas 400 kBq (4 000 kBq de ³H et ¹⁴C) ou une activité de tout objet ne contenant pas plus de 40 kBq (400 kBq de ³H et ¹⁴C) ;
 - ✓ en cas de volume significatif : ces déchets radioactifs peuvent être stockés en décharge conventionnelle, avec une activité maximale de 4 MBq/t (40 MBq/t pour ³H) ;
- les déchets de faible activité (low level waste, LLW) dont l'inventaire radiologique n'excède pas 4 GBq/t en émetteur alpha et 12 GBq/t en émetteurs bêta et gamma ;
- les déchets de moyenne activité (intermediate level waste, ILW) dont le niveau de radioactivité excède la borne haute définie pour les déchets de faible activité mais dont la température n'est pas à prendre en compte pour la conception des installations d'entreposage et de stockage ;
- les déchets de haute activité (high level waste, HLW) dont la température est significativement élevée du fait de la radioactivité et doit être pris en compte pour la conception des installations d'entreposage et de stockage.

En termes de quantités, l'inventaire au 1^{er} avril 2016 fait état de :

- 30 100 m³ de déchets de faible activité ;
- 99 000 m³ de déchets de moyenne activité ;
- 1 960 m³ de déchets de haute activité.

Les projections à 2125 font état des quantités suivantes (hors déchets de haute activité) :

- 2 860 000 m³ de déchets très faible activité ;
- 1 320 000 m³ de déchets de faible activité ;
- 191 000 m³ de déchets de moyenne activité.

10.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

10.3.1 Solutions de gestion actuelle

LLWR Limited (sous contrat avec le National decommissioning authority) dispose d'une autorisation pour le stockage de déchets radioactifs de faible activité dans l'installation localisée à Drigg près de Sellafield. Le stockage est exploité depuis 1959. Depuis 2015, le site de Dounreay en Ecosse abrite également une installation de stockage pour les déchets de faible activité destinée à accueillir les déchets produits par le démantèlement de ses installations.

Les déchets de moyenne activité sont entreposés à Sellafield et d'autres sites dans l'attente d'une solution de stockage définitif. Un nouvel entreposage d'une capacité de 2 500 m³ est prévu à Harwell.

Les déchets de haute activité, dont l'inventaire est principalement constitué des déchets vitrifiés issus du traitement du combustible usé, sont entreposés à Sellafield. Le combustible usé issu du réacteur Sizewell B est entreposé à sec sur le site.

10.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

En 2001, le gouvernement britannique a engagé le programme Managing radioactive waste safely (MRWS). A l'issue d'une consultation publique, un comité indépendant, le Committee on radioactive waste management (CoRWM) fut mis en place pour recommander des options pour la gestion sur le long terme des déchets de haute et moyenne activité. À l'issue de trois années de délibération, le CoRWM recommanda le stockage géologique.

Le processus de sélection d'un site, lancé au début des années 2010, s'appuyait sur une invitation d'expression d'intérêt des municipalités. Le processus prévoyait que lorsqu'une candidature serait retenue, il s'en suivrait 10 années de recherche en surface puis 15 années de recherche en souterrain et de construction de l'installation. Après l'échec d'un premier appel à candidature, un nouveau processus a été lancé par le gouvernement en 2019. Le RWMD estime que le processus de sélection et de caractérisation d'un site devrait s'étaler sur 15 ans à 20 ans.

En 2015, le gouvernement britannique a désigné le stockage géologique comme Nationally significant infrastructure project. Cette procédure doit permettre notamment d'accélérer les démarches administratives d'octroi d'une licence pour l'installation qui devra recevoir les déchets produits par les installations en fonctionnement et les installations en construction.

10.3.3 Alternatives envisagées

Le Royaume-Uni n'envisage pas à l'heure actuelle d'option alternative au stockage géologique mais réalise périodiquement une revue des solutions alternatives et de l'état des recherches à l'international. Ainsi, le National decommissioning authority a publié en mars 2017 un rapport intitulé Geological disposal : review of alternative radioactive waste management options. Le document porte sur quatre options : entreposage de longue durée, traitement des déchets pour en réduire le volume et la toxicité, stockage en sub-surface et forage profond. Il y est indiqué en conclusion qu'en l'état actuel des connaissances, aucune de ces options ou combinaison d'options ne permet d'exclure la nécessité d'un stockage géologique.

10.4 Modalités de financement

En 2019, le National decommissioning authority estime le coût de gestion des sites dont il a la propriété à 124 milliards de livres (soit 135 milliards d'euros) sur les 120 prochaines années, les différentes

évaluations allant de 99 milliards à 232 milliards de livres (118 à 276 milliards d'euros). Cette évaluation couvre le démantèlement, la remédiation des sites et la gestion des déchets.

Le coût brut du stockage géologique est estimé à 12 milliards de livres (soit environ 13,1 milliards d'euros) ce coût incluant la conception, la construction, le fonctionnement (à partir de 2040) et la fermeture de l'installation (vers 2100). Le processus de sélection d'un site devrait aboutir vers 2025.

Le démantèlement et la gestion des déchets radioactifs des réacteurs en fonctionnement est à la charge de l'exploitant EDF Energy. Le coût associé est estimé à 20 milliards de livres (soit 23,8 milliards d'euros). Fin 2018, le fonds dédié (Nuclear liabilities fund) disposait de 9,261 milliards de livres (soit 11 milliards d'euros).

Le fonctionnement des futurs réacteurs produira des déchets radioactifs destinés au stockage géologique. Conformément à The energy act de 2008, l'exploitant doit élaborer un plan de financement pour la gestion de ces déchets et alimenter en conséquence le Nuclear liabilities fund. In fine, la responsabilité de la gestion des déchets de moyenne et haute activité sera transférée au gouvernement moyennant finances (environ 1,1 milliards de livres, soit environ 1,3 milliards d'euros) pour un réacteur à eau pressurisée de 1 350 MWe⁸⁶).

⁸⁶ Megawatt électrique.

Annexe 11 Gestion des déchets de type HA et MA-VL et en Russie

11.1 Contexte national

En 2018, la Russie comptait près de 147 millions d'habitants avec un PIB d'environ 1 404 milliards d'euros.

11.1.1 Politique énergétique

La Russie compte 36 réacteurs en fonctionnement (29 gigawatt électrique installés) qui produisent environ 20 % de l'électricité (18,4 % en 2018). En 2019, six réacteurs sont en construction, 24 sont planifiés et 22 sont en projet.

La planification énergétique prévoit un rôle croissant des réacteurs à neutrons rapides dès les années 2020 et un recyclage important du combustible usé afin de brûler les actinides et de limiter la consommation d'uranium. Environ 100 tonnes de produits de fission produits annuellement seraient alors destinés au stockage géologique.

11.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

Les deux lois encadrant les activités nucléaires en Russie sont la Loi fédérale sur l'utilisation de l'énergie atomique (1995 (146)) et la Loi fédérale sur la sécurité radiologique des populations (1996). Cette seconde loi est supervisée par le Ministère fédéral de la santé.

En Russie, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets radioactifs sont les suivants (147) (148) :

L'autorité en charge de la sûreté nucléaire, mise en place en 1992, est **Rostekhnadzorest** ; elle est placée sous l'autorité directe du gouvernement depuis 2010.

En juin 2011, le parlement russe, la Duma, a voté une loi fédérale qui établit le cadre législatif dans lequel s'inscrit la gestion des déchets radioactifs en Russie. La loi établit la durée de fonctionnement des entreposages, les limites sur les volumes de déchets produits, les modalités de conditionnement et de transfert de déchets et le financement de ces activités par la mise en place d'un fonds dédié géré par Rosatom.

Rosatom est une entreprise publique créée en 2007 pour prendre en charge l'ensemble des **activités nucléaires civiles et militaires de la Russie**, soit plus de 350 organisations et sociétés. FSUE RosRAO est une société créée en 2009 détenue par Rosatom et spécialisée dans le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets de faible et moyenne activité.

Rosatom et FSUE NO RAO, agence fédérale russe en charge de la gestion des déchets radioactifs créée en 2012, coordonnent les travaux associés à la gestion et donc au stockage des déchets radioactifs produits par le cycle électronucléaire et la défense. FSUE NO RAO est l'unique organisation autorisée à exploiter des installations de stockage définitif de déchets radioactifs. Le prix des services fournis par FSUE NO RAO est fixé par le Ministère en charge des ressources naturelles.

11.2 Sources, types et quantités de déchets

La loi sur les déchets de 2012 fournit les éléments de catégorisation des déchets radioactifs suivants :

- classe 1 : déchets radioactifs solides de haute activité devant être stockés en formation géologique profonde après une période d'entreposage visant à réduire leur puissance thermique ;

- classe 2 : déchets radioactifs solides de haute et moyenne activité à vie longue (contenant des radionucléides avec une période radioactive supérieure à 31 ans) devant être stockés en formation géologique profonde sans période d'entreposage préalable ;
- classe 3 : déchets radioactifs solides de moyenne et faible activité à vie longue (contenant des radionucléides avec une période radioactive supérieure à 31 ans) devant être stockés en subsurface (profondeur jusqu'à 100 mètres) ;
- classe 4 : déchets radioactifs solides de faible et très faible activité devant être stockés en surface ;
- classe 5 : déchets radioactifs liquides de moyenne et faible activité devant être stockés en puits profonds ;
- classe 6 : déchets radioactifs produits par les activités minières et le traitement des minerais d'uranium ou produits à l'extérieur de l'industrie nucléaire devant être stockés en surface.

Fin 2016, l'inventaire russe de déchets radioactifs sur le territoire fait état de 556 106 m³ correspondant à une activité totale de 114.10⁺²⁰ Bq (147). A Mayak, le traitement du combustible usé a produit environ 2 500 m³ de déchets vitrifiés de haute activité. Environ 32 106 m³ de déchets radioactifs doivent être gérés dans le cadre du programme supervisé par FSUE NO RAO, pour un coût de 4,2 milliards d'euros dont 80 % sont financés par les exploitants et 20 % par le budget fédéral. En 2013, environ 24 000 tonnes de combustibles usés étaient en attente d'un exutoire (recyclage et/ou stockage).

Dans le second plan fédéral sur la sûreté nucléaire et la radioprotection approuvé par le gouvernement en novembre 2015 sur la période 2016-2030, Rosatom indique que l'enjeu principal est la gestion de l'héritage de l'époque soviétique dans laquelle a été investi 123 milliards de roubles sur 2008-2015 (environ 1,7 milliards d'euros). Sur les 576 milliards de roubles du second plan, 20 % (soit environ 1,6 milliards d'euros) sont alloués à la création d'infrastructures pour la gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs, incluant le stockage géologique pour les déchets de haute activité.

11.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

11.3.1 Solutions de gestion actuelle

L'importation tout comme l'exportation de déchets radioactifs sont proscrits par la loi.

Les déchets de faible et de moyenne activité (correspondant aux classes 3 et 4) sont stockés dans 16 installations de stockage exploitées par Radon (FSUE NO RAO). Des capacités supplémentaires sont attendus pour ces déchets :

- 214 000 m³ à Ozersk ;
- 150 000 m³ à Tomsk ;
- 150 000 m³ à Novouralsk ;
- 50 000 m³ à Sosnovy Bor.

Il convient de noter que la Russie a, durant plusieurs années, injecté des déchets de faible et moyenne activité dans des puits profonds (entre 300 et 1 500 mètres), principalement à Seversk (30 106 m³), Zheleznogorsk et Dimitrovgrad. Cette modalité de gestion qui repose uniquement sur la roche hôte pour assurer le confinement du déchet (pas de colis, pas de barrière ouvragée) n'a pas été proscrite et figure dans la loi de 2011. En août 2016, le stockage en puits profonds de 50 106 m³ de déchets radioactifs liquide a été approuvé.

11.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

Actuellement, il n'y a pas d'installation de stockage pour les déchets de haute activité et les déchets solides de moyenne activité à vie longue.

Un processus de sélection de site a permis d'identifier 30 implantations potentielles dans 18 régions. En 2008, le massif granitique de Nizhnekansky à Zheleznogorsk dans le territoire de Krasnoyarsk a été proposé pour accueillir une installation de stockage en formation géologique profonde. En août 2016, le schéma de planification énergétique à 2030 de la région a confirmé le site et la construction d'un stockage pouvant accueillir 4 500 m³ de déchets de haute activité de classe 1 et 155 000 m³ de déchets haute et moyenne activité à vie longue de classe 2. FSUE NO RAO prévoit de construire un laboratoire de recherches souterrain dans le massif granitique de Nizhnekansky et d'y effectuer 9 années de recherches.

La première tranche du stockage devrait permettre d'accueillir de manière réversible 20 000 tonnes de déchets de moyenne et haute activité.

11.3.3 Alternatives envisagées

En mars 2015, la société Energospetsmontazh a annoncé l'engagement d'essai de traitement de déchets solides de faible et de moyenne activité par torche à plasma.

La stratégie nucléaire russe paraît comme la plus ambitieuse et la plus avancée en termes de traitement du combustible dans une optique de réduction du volume et de la toxicité des déchets destinés au stockage géologique (traitement du combustible mix U Pu REMIX au Complexe MCC à Krasnoyarsk, etc.). Pour autant, il est reconnu que cette stratégie ne permet pas de s'affranchir d'un stockage géologique.

11.4 Modalités de financement

Depuis la loi sur les déchets de 2011, tout déchet radioactif produit par les exploitants est géré suivant le principe pollueur-payeur. L'État russe est « propriétaire » de tous les déchets radioactifs produits avant le 15 juillet 2011.

Les coûts de stockage ont été définis comme suit en 2016 par le ministère en charge des Ressources naturelles et de l'Environnement :

- classe 1 : 1 246 510 roubles/m³ (16 792 euros/m³) ;
- classe 2 : 566 954 roubles/m³ (7 638 euros/m³) ;
- classe 3 : 132 681 roubles/m³ (1 787 euros/m³) ;
- classe 4 : 37 520 roubles/m³ (505 euros/m³) ;
- classe 5 : fonction de l'origine : 6 675 ou 1 102 ou 508 roubles/m³ (90 ou 15 ou 7 euros/m³) ;
- classe 6 : 175 roubles/m³ (2 euros/m³).

Annexe 12 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Suède

12.1 Contexte national

En 2018, la Suède comptait 10 millions d'habitants avec un PIB d'environ 471 milliards d'euros.

12.1.1 Politique énergétique

La Suède exploite 8 réacteurs nucléaires répartis sur 3 sites et produisant environ 40 % de son électricité (63 TWh en 2016). Trois exploitants sont recensés : Vattenfall, E.On Sweden AB et Fortum Oy. La Suède prévoit la fermeture de ses réacteurs d'ici à 2045 et n'envisage pas à l'heure actuelle la construction de nouvelles installations, même si le débat sur cette question ne semble pas clos. Le cycle électronucléaire suédois est ouvert : il n'y a pas de retraitement du combustible usé.

12.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Suède, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets radioactifs sont les suivants (149) (150) :

- Selon la législation suédoise (The act on nuclear activities, 1984 (151)), **les producteurs de déchets radioactifs** ont la responsabilité du financement de la gestion de ces déchets et doivent, sur la base d'un programme de R&D, développer un « système » de stockage définitif pour le combustible usé et les déchets radioactifs, en application du principe du pollueur-payeur ;
- La **Swedish nuclear fuel and waste management company, SKB**, a été créé en 1972 par les exploitants. SKB est chargé de la **gestion des déchets radioactifs et du combustible usé** en Suède. Ainsi, SKB conçoit et exploite les installations d'entreposage et de stockage pour tout type de déchets radioactifs. SKB est ainsi responsable du laboratoire souterrain d'Aspö où sont réalisées des recherches sur le stockage géologique en formation granitique. Tous les 3 ans, SKB présente son programme de R&D au gouvernement qui doit l'approuver.
- L'**Autorité suédoise de sûreté nucléaire, SSM**, est le régulateur suédois depuis 2008. SSM a été créé à partir de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (SKI) et de l'Autorité en charge de la Radioprotection (SSI).
- Le **Conseil national suédois sur les déchets nucléaire** est un comité pluridisciplinaire (éthique, sciences naturelles, sciences sociales, etc.) qui élabore entre autres des recommandations à l'attention du gouvernement suédois sur le stockage des déchets radioactifs et du combustible usé.

12.2 Sources, types et quantités de déchets

La Suède ne dispose pas d'une classification réglementaire pour les déchets radioactifs. SKB a développé un système de classification pour l'industrie nucléaire (déchets de haute activité, déchet de faible et moyenne activité à vie longue, déchet de moyenne activité à vie courte, déchet de faible activité à vie courte).

Le combustible usé, après déchargement et entreposage dans une installation dédiée, est considéré comme un déchet et constitue l'essentiel de l'inventaire des déchets de haute activité.

12.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

12.3.1 Solutions de gestion actuelle

Les déchets radioactifs à vie courte produits par les exploitants sont stockés à Forsmark depuis 1988 dans l'installation SFR, d'une capacité de 63 000 m³, qui accueille également les déchets d'autres secteurs, en particulier du médical. SKB a déposé une demande d'autorisation de création d'une nouvelle installation de ce type (SFR 2), toujours à Forsmark, afin de faire face à l'afflux à venir de déchets issus du démantèlement des installations nucléaires. L'extension porte sur une capacité totale (SFR et SFR 2) de 170 000 m³ et le début de fonctionnement de SFR 2 est prévu pour 2028.

Les déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie longue sont entreposés sur les lieux de production que sont les centrales, à Studsvik et au CLAB, dans l'attente d'une solution de stockage définitif à l'horizon 2045. À l'heure actuelle, la nature de l'exutoire n'est pas figée, mais il s'agirait d'une installation de stockage géologique distincte du stockage géologique destiné à recevoir les combustibles usés. Un dépôt de demande d'autorisation de création est prévu pour 2030. La capacité envisagée de l'installation est de 16 000 m³.

Le combustible usé est entreposé en piscine dans une installation centralisée (CLAB, Oskarshamn) depuis 1985. L'installation est située dans une cavité souterraine (entre 25 et 30 mètres de profondeur) et la durée prévue d'entreposage est de 40 à 50 ans. Environ 6 700 tonnes de combustibles sont actuellement entreposées. L'autorisation de fonctionnement de l'installation portant sur 8 000 tonnes, une demande d'extension de la capacité d'entreposage à 11 000 tonnes a été déposée en 2015.

12.3.2 Solution de gestion définitive envisagée pour les déchets de haute et moyenne activité

Le site de Forsmark a été sélectionné en 2009 pour abriter l'installation à l'issue d'un long processus qui a débuté dans les années 1980. A cette époque, SKB a réalisé des études géologiques impliquant entre autres des forages destinés à la caractérisation des roches et s'est heurté à de nombreuses protestations locales. Dès lors, l'acceptabilité locale est devenue un principe clé du processus de recherche et de sélection d'un site, lancé en 1992. Les investigations de terrain ont débuté en 2002 à Forsmark et Oskarshamn et ont duré 5 ans.

SKB a déposé une demande d'autorisation de création d'une installation de stockage géologique pour le combustible usé en mars 2011 et la procédure d'autorisation est toujours en cours en 2019. En janvier 2018, soit sept années après le dépôt de la demande de SKB, les avis de la Land and environment court et de SSM ont été transmis au gouvernement suédois à qui il appartient désormais d'accorder l'autorisation de construction du stockage. Dans son avis, la Land and environment court a souligné les incertitudes significatives sur le phénomène de corrosion des conteneurs en cuivre. Elle a également indiqué que la responsabilité de l'État à l'issue de la fermeture de l'installation devait être établie. SSM a émis un avis favorable tout en soulignant l'importance de conduire des recherches complémentaires, en particulier sur la corrosion des conteneurs. Une décision est attendue pour 2020 pour un démarrage du fonctionnement vers 2030.

Le principe du stockage, appelé KBS 3, repose sur la mise dans un conteneur de cuivre des combustibles usés. Les colis seront placés à une profondeur de l'ordre de 500 mètres dans la roche hôte. Une barrière ouvragée en bentonite (argile) est également prévue. Les colis doivent être protégés pour au moins 100 000 ans des conséquences d'un tremblement de terre, d'une période glaciaire et de l'intrusion humaine (intentionnelle ou non). Des travaux de recherche sont réalisés au laboratoire souterrain d'Aspö au Nord d'Oskarshamn, à environ 460 mètres de profondeur. Ces travaux visent à investiguer le comportement des différentes barrières du futur stockage : conteneur, barrière ouvragée, roche et à tester différents équipements pour la manutention de colis.

La construction, le fonctionnement et la fermeture de l'installation s'étaleront sur 70 années. Le stockage aura une capacité de stockage de 12 000 tonnes de combustibles usés.

12.3.3 Alternatives envisagées

Les éléments bibliographiques consultés ne font état d'aucune alternative envisagée.

12.4 Modalités de financement

Le Act on financing of management of residual products from nuclear activities établit les principes de financement des dépenses liées au démantèlement des installations nucléaires et à la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Les exploitants doivent estimer ces coûts et alimenter en conséquence un fonds dédié, le Swedish nuclear waste fund qui est contrôlé par le gouvernement et investi en bons du trésor ou en obligations garanties. Le financement inclut également les activités de recherche. L'État est ultimement responsable pour la gestion sur le long terme du combustible usé et des déchets radioactifs.

Les exploitants doivent produire tous les trois ans une estimation des coûts futurs associés à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement des installations (152). Les évaluations sont transmises au SSM qui en retour propose à chaque exploitant une estimation des sommes à payer sur les 3 années à venir.

SKB fournit les estimations ci-après en rapport avec les coûts futurs devant être supportés par les exploitants (coût brut hors actualisation, ces coûts sont également estimés pour des taux fixes d'actualisation de 1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

Tableau Annexe 12.4-1 Coûts de gestion des déchets radioactifs et du démantèlement des réacteurs nucléaires en Suède

		Cost per cost category, SEK million	Cost per facility, SEK million
SKB's central functions and operation of laboratories		5 260	5 260
Transportation system	investment	1 270	2 830
	operation and maintenance	1 570	
Clab	reinvestments	2 130	11 210
	operation and maintenance	8 320	
	decommissioning	750	
Encapsulation	investment	4 910	15 310
	operation, maintenance and reinvest- ments	10 150	
	decommissioning	250	
Spent Fuel Repository			
– above ground	feasibility studies, technology develop- ment and safety assessment	2 420	31 560
	investment and decommissioning	6 680	
	operation and maintenance (entire facility)	5 070	
	reinvestments (entire facility)	2 330	
– other rock openings	investment	2 960	
	decommissioning and closure	1 470	
– main and deposition tunnels	investment	6 380	
	decommissioning, backfilling and closure	4 260	
SFL	feasibility studies, technology develop- ment and safety assessment	800	2 030
	investment	720	
	operation, maintenance and reinvest- ments	240	
	decommissioning and closure	280	
Interim storage facilities and near- surface repositories at NPPs	investment, operation and decommis- sioning	110	110
SFR (operational waste)	operation, maintenance and reinvest- ments	1 090	1 090
SFR (decommissioning waste)	feasibility studies, technology develop- ment and safety assessment	840	4 860
	investment	2 080	
	operation, maintenance and reinvest- ments	1 610	
	decommissioning and closure	330	
Decommissioning of NPPs		23 700	23 700
Total reference cost (excluding adjustment for EEF and allowance for unforeseen factors and risk)			97 970

CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0067-A

Le coût du stockage géologique pour le combustible utilisé - encapsulation et Spent fuel repository - est de l'ordre de 47 milliards de couronnes suédoises (SEK), soit 4,4 milliards d'euros.

Annexe 13 Gestion des déchets de type HA et MA-VL en Suisse

13.1 Contexte national

En 2018, la Suisse comptait 8,5 millions d'habitants avec un PIB d'environ 597 milliards d'euros.

13.1.1 Politique énergétique

En Suisse, l'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité a débuté en 1969, avec la mise en service du réacteur Beznau I. La construction de nouvelles centrales nucléaires s'est ensuite poursuivie pour s'interrompre en 1984. Aujourd'hui, la Suisse compte 5 réacteurs nucléaires, répartis sur quatre sites (Beznau, Gösgen, Leibstadt, Mühleberg), couvrant environ 40 % de la production électrique du pays. À la suite de l'accident de Fukushima, le Parlement a décidé en juin 2011 de ne pas remplacer les réacteurs et, par voie de conséquence, d'éliminer progressivement la production d'énergie nucléaire. Cette décision a été confirmée en 2017 par un référendum national sur la stratégie énergétique 2050. La construction de nouvelles centrales nucléaires est donc désormais interdite. Quant au fonctionnement des réacteurs, il se poursuivra jusqu'à ce que leur sûreté soit maintenue. Les réacteurs en Suisse ne sont en effet pas limités à une durée de fonctionnement maximum. Ils doivent cependant respecter l'ensemble des normes de sûreté évaluées périodiquement à l'occasion de visites décennales.

Jusqu'en 2003, le combustible nucléaire usé issu des centrales suisses était envoyé en France et au Royaume-Uni pour y être retraité. Tous les déchets issus du retraitement ont été renvoyés en Suisse. À la suite d'un moratoire au cours de la période 2006-2016, le transfert du combustible usé pour retraitement a été interdit. Suite au référendum sur la stratégie énergétique 2050, le retraitement est désormais interdit de manière permanente.

13.1.2 Panorama des acteurs du nucléaire et textes réglementaires associés à la gestion des déchets radioactifs

En Suisse, la gestion effective des déchets radioactifs est gérée par les producteurs de déchets eux-mêmes, en vertu du principe pollueur-payeur. Les acteurs principaux de la gestion des déchets radioactifs se répartissent donc comme suit (153) (154) :

- Les **offices fédéraux** qui appuient le Conseil fédéral en matière de gestion des déchets radioactifs. Plus précisément, l'Office fédéral de l'énergie (Ofen) réalise et organise les procédures d'autorisation à l'intention du Conseil fédéral. Il contrôle également la recherche de sites aptes à abriter un stockage géologique profond. L'Office fédéral de la santé publique (OFSP) est quant à lui responsable du contrôle des installations nucléaires relatives aux activités médicales, industrielles et de recherche ainsi que de la gestion de leurs déchets radioactifs ;
- L'**autorité de sûreté nucléaire**, nommée **Inspection fédérale de la sécurité nucléaire** (IFSN/ENSI), a été créée en janvier 2009 et est chargée d'évaluer la sécurité des centrales nucléaires. L'IFSN est également responsable du suivi scientifique des études dédiées à la mise en place d'un stockage géologique des déchets radioactifs ;
- La **Commission de sécurité nucléaire** (CSN) se compose de 5 à 7 experts en sûreté nucléaire. Elle a un rôle de conseil auprès du Conseil fédéral et de l'IFSN sur les dossiers de sûreté soumis par les installations nucléaires. Elle peut émettre un avis sur les instructions réalisées par l'IFSN.
- Le **Groupe de travail de la Confédération pour la gestion des déchets nucléaires** (AGNEB) a été créé par le Conseil fédéral en 1978. Il est chargé de suivre les dossiers relatifs à la gestion des déchets radioactifs et d'émettre un avis sur le sujet à l'intention du Conseil fédéral ;
- Le **gestionnaire, la Coopérative d'entreposage des déchets radioactifs** (Nagra - Nationale genossenschaft für die lagerung radioaktiver), a été créée en 1972 par les électriciens – producteurs de déchets radioactifs – ainsi que le Gouvernement fédéral. La Nagra a pour mission de prendre en

charge et de stocker l'ensemble des déchets radioactifs produits en Suisse. Dans ce cadre, la Nagra réalise l'ensemble des travaux de recherche associés à l'implantation de futur(s) site(s) de stockage(s) géologique(s) dont elle assurera la construction et le fonctionnement par la suite. À ce titre, la Nagra dispose de laboratoires souterrains lui permettant d'y réaliser divers programmes de recherche. Le laboratoire souterrain de Grimsel, construit en 1983, est situé dans la roche granitique du massif de l'Aar. Le laboratoire souterrain du Mont-Terri, inauguré en 1998, est localisé au nord de Saint-Ursanne, dans le canton du Jura, à 300 mètres de profondeur. Ce laboratoire souterrain international est financé par les organisations de 6 pays (dont l'Andra). Il vise, entre autres, à caractériser sa formation hôte : les argiles à opalines ;

- La société Zwiilag, est une société privée détenue par les 4 électriciens suisses. Cette société est responsable du centre d'entreposage temporaire des déchets radioactifs ZZL, situé à Würenlingen ;
- Les électriciens sont au nombre de quatre entreprises privées : NOK-Axpo, KKG, Alpiq et BKW.

La gestion des déchets radioactifs est globalement orchestrée par la loi sur l'énergie nucléaire (LEnu) (155) ainsi que par l'ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENU) (156), toutes deux en vigueur depuis le 1^{er} février 2015. Plus précisément, la loi LENU définit les grands principes de la gestion des déchets radioactifs en précisant notamment que ces derniers doivent être stockés dans des couches géologiques profondes. L'ordonnance OENU précise quant à elle les dispositions de mise en place de la loi LENU en apportant notamment un éclairage sur le rôle de la Confédération. L'ordonnance définit également les modalités de financement du démantèlement ainsi que de la gestion des déchets radioactifs.

13.2 Sources, types et quantités de déchets

En Suisse, la majeure partie des déchets radioactifs provient de l'industrie électronucléaire. Ces déchets sont classés en trois catégories principales :

- les déchets de faible et moyenne activité (FMA) résultant du fonctionnement des centrales nucléaires ainsi que des activités de la recherche ou des secteurs médical et industriel.
- les déchets alpha-toxiques (ATA) correspondant aux déchets dont la concentration en émetteurs alpha est supérieure à 20 000 Bq/g.
- les déchets hautement radioactifs (DHA) qui regroupent le combustible usé ainsi que les déchets issus de son retraitement.

Pour une durée de fonctionnement des centrales nucléaires estimée à 60 ans, la Nagra s'attend à devoir gérer près de 9 400 m³ de déchets à haute activité, 1 000 m³ de déchets alpha-toxiques et plus de 80 000 m³ de déchets de faible et moyenne activité. Ces volumes incluent le volume associé aux conditionnements des déchets.

13.3 Solutions de gestion des déchets radioactifs

Pour les trois catégories de déchets radioactifs définis par la législation suisse, deux types de stockage géologique sont envisagés pour leur gestion définitive :

- un stockage pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte ;
- un stockage pour les déchets de haute activité et potentiellement les déchets de moyenne activité à vie longue.

En attendant la mise en place de telles installations de stockage, les déchets sont aujourd'hui entreposés sur leurs lieux de production (sites des centrales) ainsi que dans des entreposages centralisés.

13.3.1 Solutions de gestion actuelle

En Suisse, chaque centrale entrepose des déchets radioactifs de faible et moyenne activité, ainsi que du combustible usé sur son site de production. Le site de la centrale nucléaire de Beznau dispose quant à lui de son propre centre d'entreposage intermédiaire à sec, le Zwibez, mis en service en 1994. Il est composé de deux halls d'entreposage, l'un dédié aux déchets de faible et moyenne activité pour une capacité de 6 000 m³, et l'autre réservé aux déchets de haute activité dont la mise en service remonte à fin 2008. L'institut de recherche Paul Scherrer dispose quant à lui d'un centre de stockage temporaire (BZL) dédié aux déchets de faible et moyenne activité provenant des activités médicale, industrielle et de recherche. Ce site est implanté à Würenlingen, près de la centrale de Beznau.

En 2001, la Suisse a également mis en service une installation d'entreposage centralisée nommée ZZL, exploitée par Zwiilag, à proximité du centre BZL. Ce centre est destiné à regrouper l'ensemble des déchets vitrifiés issus du retraitement de la Hague et de Sellafield, le combustible usé ainsi que les déchets de moyenne activité à vie longue, en attendant une solution de stockage définitive. Ce centre de stockage est complété d'un incinérateur à torche à plasma et d'un bâtiment de conditionnement des déchets de faible activité.

13.3.2 Solution de gestion définitive envisagée

Depuis sa création en 1972, la Nagra cherche à définir des concepts de stockage de déchets radioactifs dans différents milieux géologiques. La Nagra a fait le choix de développer deux types de stockage différents dédiés respectivement aux déchets de faible et moyenne activité à vie courte et aux déchets de haute et moyenne activité vie longue. Prévus pour être indépendants, ces deux types de stockage pourraient être construits sur le même site, sans être pour autant placés dans la même formation géologique. En 1998, la Nagra a apporté au Conseil fédéral la démonstration de faisabilité d'un stockage géologique profond dans une formation d'argiles à opalines, pour les déchets de faible et moyenne activité. En 2002, une seconde démonstration de faisabilité dédiée cette fois-ci au stockage géologique profond, pour les déchets de haute activité et les déchets alpha-toxiques, a été soumise au Conseil fédéral, toujours dans une formation d'argile à opalines. Ces démonstrations de faisabilité ont été validées par le Conseil fédéral en 2006. Depuis 2008, les progrès relatifs à la mise en place des stockages géologiques suivent une planification précise, définie par le plan sectoriel « dépôts en couches géologiques profondes », développé par l'Ofen, en consultation avec diverses parties prenantes. Ce plan permet la mise en place d'une démarche équitable, transparente et participative au moyen de trois grandes étapes.

- L'étape 1 (2008-2011) a consisté en la sélection de régions abritant des formations géologiques adéquates pour un stockage profond de déchets radioactifs. En novembre 2011, le Conseil fédéral a approuvé la sélection de six régions. Toutes les régions proposées conviennent au stockage de déchets de faible activité, et trois d'entre elles peuvent héberger un stockage de déchets de haute activité ;
- L'étape 2 (2011-2018) a cherché à retenir au moins deux sites possibles pour chaque type de stockage envisagé. Le processus de sélection a notamment fait appel à une consultation des parties prenantes locales, qui ont pu faire valoir leurs avis à partir de propositions d'infrastructures de surface associées aux différentes options de stockages géologiques dans les régions présélectionnées. Les résultats de ce processus ont été soumis au Conseil fédéral en janvier 2015. Deux régions situées à l'est du Jura et au nord de Zürich ont été proposées pour une évaluation plus approfondie. La région au nord de Lägern a été introduite dans le processus par ENSI/IFSN. Ces trois régions conviendraient aussi bien pour un stockage géologique de déchets de faible activité que celui de haute activité, dans une formation géologique d'argile à opalines ;
- L'étape 3 a débuté en 2018 et comprend des études de caractérisation détaillée du sous-sol des trois sites proposés. Les résultats de ces études devraient conduire à la sélection d'un ou de deux sites dédiés à l'implantation des deux différents stockages de déchets radioactifs. Les premiers travaux d'exploration ont d'ailleurs débuté au printemps 2019 à Bülach, dans la région de Zürich.

Le Conseil fédéral devrait se prononcer sur le choix définitif du site ou des sites et l'octroi possible d'une autorisation de construction d'ici 2029, ce qui clôturera la troisième étape du processus. Ensuite, la décision du Conseil fédéral devra être approuvée par le Parlement. La résolution parlementaire pourrait être sujette à un référendum national vers 2031. Il est prévu que le centre de stockage de déchets de faible et moyenne activité entre en fonctionnement vers 2050. Le centre de stockage de déchets de haute activité entrerait pour sa part en service vers 2060.

13.4 Modalités de financement

Les modalités de gestion des déchets radioactifs sont définies dans l'ordonnance OENu du 1^{er} février 2015, qui précise qu'en vertu du principe pollueur-payeur, les producteurs sont tenus de stocker à leurs frais les déchets radioactifs qu'ils produisent. Plus précisément, les producteurs se doivent de couvrir les coûts de gestion des déchets tout au long du fonctionnement de leur installation nucléaire. Une fois l'installation arrêtée et hors service, les frais de gestion des déchets sont alors pris en charge par un fonds de gestion indépendant. Ce fonds de gestion est approvisionné par les producteurs tout au long du fonctionnement de leur installation. La gestion de ce fond est placée sous le contrôle du Conseil fédéral. En 2016, l'estimation des coûts de gestion des déchets radioactifs s'élevait à environ 20 milliards de francs suisses (CHF, soit 18,79 milliards d'euros). Fin 2015, les coûts de gestion à couvrir pendant le fonctionnement s'élevaient à environ 5,5 milliards de francs suisses (5,17 milliards d'euros), pour atteindre environ 7,5 milliards de francs suisses (7,05 milliards d'euros) au moment de l'arrêt de l'ensemble des centrales. Les producteurs doivent donc encore prendre en charge 2 milliards de francs suisses (1,88 milliards d'euros). Le fonds de gestion doit quant à lui couvrir les 10,5 milliards de francs suisses (9,86 milliards d'euros) restant. Fin 2015, la valeur du fonds de gestion atteignait 4,2 milliards de francs suisses (3,95 milliards d'euros). Le fonds de gestion continue d'être complété par le rendement du capital ainsi que par les sommes versées par chacun des producteurs. Les calculs du fonds de gestion des déchets se basent sur un rendement de 2 %.

Annexe 14 Fondement théorique sur le taux d'actualisation

14.1 Cadre théorique et appliqué du taux sans risque

14.1.1 Formule de Ramsey et effet richesse

L'estimation du taux sans risque, ici dénoté r_f est appréhendée dans le rapport Lebègue (2005 (54)) *via* la formule de Ramsey :

$$r_f = \gamma\mu + \delta$$

Elle prend en compte deux effets : $\gamma\mu$, l'effet richesse ; et δ , le taux de préférence pure pour le présent.

L'effet richesse est composé de deux paramètres : μ correspond aux anticipations portant sur la croissance économique, et γ l'élasticité marginale de la consommation (ou aversion relative à l'inéquité intertemporelle) ; ce dernier paramètre γ modélise donc le fait que l'utilité croît relativement moins que la croissance de la consommation.

L'effet richesse reflète le comportement pro-cyclique du taux d'intérêt observé sur les marchés financiers. Concernant le taux d'actualisation socioéconomique, si les individus anticipent une croissance économique forte, ils accorderont un poids plus fort à une variation de la consommation aujourd'hui, plutôt qu'à une variation de taille identique de la consommation dans un futur certainement meilleur. En d'autres termes, une variation de la consommation de la même taille entraîne, sous l'hypothèse d'une croissance économique, une variation de l'utilité plus importante aujourd'hui que dans le futur (utilité marginale décroissante) ; retarder cette consommation réduira donc le bien-être inter-temporel (Gollier 2016 (55)).

Gollier (2016 (55)) propose de retenir $\gamma = 2$; en d'autres termes, l'effet richesse est égal au double de la croissance. En supposant que les taux de croissance passés sont extrapolables sur l'avenir, le taux de croissance moyen réel du PIB par habitant en France de 1,75 % sous-tend un taux sans risque de 3,50 % (Gollier, 2016 (55)). Le taux d'actualisation, égal au seul effet richesse, obtenu par Gollier est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau Annexe 14.1-1 Taux d'actualisation $r = \gamma\mu$, Gollier (2016 (55))

	Pays	Taux de croissance du PIB/hbt	Taux d'actualisation
Pays développés	USA	1,74 %	3,48 %
	France	1,75 %	3,50 %
	Allemagne	1,76 %	3,52 %
	Royaume-Uni	1,86 %	3,71 %
	Japon	2,34 %	4,67 %
Pays émergents	Chine	7,60 %	15,20 %
	Corée du Sud	5,38 %	10,75 %
	Taiwan	5,41 %	10,82 %
	Inde	3,34 %	6,88 %
	Russie	1,54 %	3,08 %
Afrique	Gabon	1,29 %	2,58 %
	Liberia	-1,90 %	-3,79 %
	Zaire (RDC)	-2,76 %	-5,53 %
	Zambie	-0,69 %	-1,38 %
	Zimbabwe	-0,26 %	-0,53 %

CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0068-A

SOURCE : Mes calculs sur base des données annuelles ERS/USDA.

14.1.2 Taux de préférence pure pour le présent

Ce taux indique qu'un plaisir immédiat est préféré au même plaisir, toute chose égale par ailleurs, dans le futur. Il s'agit donc d'un taux qui reflète l'impatience des agents, ainsi que leur « probabilité de mourir ». Il est indépendant de tout phénomène économique.

En France, le rapport Lebègue (2005 (54)) proposent un taux de préférence pur pour le présent $\delta = 1\%$. Le rapport Quinet (2013 (11)) propose une valeur globale du taux sans risque, sans précision du taux de préférence pur pour le présent mobilisé.

On note toutefois que la prise en compte d'un taux de préférence pure pour le présent n'est pas unanimement partagée. Stern (2007 (17)) note que, si le projet porte sur plusieurs générations, l'utilisation de $\delta > 0$ ne peut être justifiée que pour incorporer le risque de disparition de l'humanité⁸⁷. Gollier (2016 (55)) propose de fixer $\delta = 0$, quel que soit l'horizon temporel du projet. Utiliser un taux $\delta > 0$ revient, mécaniquement, à augmenter les inégalités entre les générations. Or, sous un « voile de l'ignorance »⁸⁸, la décision optimale est celle qui réduit le « risque » (les inégalités entre les générations), et qui maximise la somme espérée des utilités de chaque génération. Il convient donc, afin d'arriver à cette décision optimale, pour les partisans de cette approche, de choisir $\delta = 0$.

⁸⁷ Stern (2007 (17)) utilise par exemple $\delta = 0,1\%$, correspondant selon lui à la probabilité de disparition de l'humanité dans les 12 prochains mois.

⁸⁸ On se place ici dans une instance imaginaire au sein de laquelle siègent des représentants de l'ensemble des générations à venir. Les représentants ne savent pas au sein de quelle génération ils vont prendre place, et l'allocation des représentants au sein des générations est aléatoire ; les représentants ont une probabilité égale d'être attribués à chaque génération.

14.1.3 Formule de Ramsey étendue

La formule de Ramsey implique une connaissance et une stabilité du terme μ – hypothèse peu réaliste, et devenant d’autant moins crédible que la durée de vie du projet est importante. En d’autres termes, l’incertitude sur l’état du monde futur n’est pas prise en compte dans cette formulation. Il paraît dès lors légitime d’ajouter à cette formulation un troisième effet, l’« effet de précaution » (règle de Ramsey étendue). Il reflète notre volonté d’épargner (investir) lorsque notre futur est incertain, versus consommer aujourd’hui ; il aura donc tendance à diminuer le taux d’actualisation. Si le taux de préférence pure pour le présent δ est supposé nul, le taux d’actualisation est donc déterminé par deux effets contradictoires : un « effet richesse », qui aura tendance à augmenter le taux d’actualisation ; un « effet de précaution », qui aura tendance à le diminuer.

Gollier (2016 (55)) définit l’« effet précaution » comme la variance du taux de croissance multiplié par le terme $\gamma \frac{1+\gamma}{2}$. Il obtient ainsi les taux d’actualisation $r = \gamma\mu - \text{effet précaution}$ suivants :

Tableau Annexe 14.1-2 Taux d’actualisation $r = \gamma\mu - \text{effet précaution}$, Gollier (2016 (55))

	Pays	Volatilité taux de croissance	Effet précaution	Taux d’actualisation
Pays développés	États-Unis	2,11 %	-0,13 %	3,35 %
	France	1,57 %	-0,07 %	3,43 %
	Allemagne	1,83 %	-0,10 %	3,42 %
	Royaume-Uni	2,18 %	-0,14 %	3,57 %
	Japon	2,61 %	-0,20 %	4,47 %
Pays émergents	Chine	3,53 %	-0,37 %	14,82 %
	Corée du Sud	3,40 %	-0,35 %	10,41 %
	Taiwan	5,29 %	-0,84 %	9,98 %
	Inde	3,03 %	-0,28 %	6,61 %
	Russie	5,59 %	-0,94 %	2,14 %
Afrique	Gabon	9,63 %	-2,78 %	-0,20 %
	Liberia	19,58 %	-11,50 %	-15,30 %
	Zaire (RDC)	5,31 %	-0,85 %	-6,38 %
	Zambie	4,01 %	-0,48 %	-1,86 %
	Zimbabwe	6,50 %	-1,27 %	-1,79 %

CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0069-A

14.1.4 Prise en compte d’évènements extrêmes

Gollier (2016 (55)) note que la validité de la formule de Ramsey étendue dépend, entre autres, de la normalité de la distribution des taux de croissance. Si les taux de croissance sont normalement distribués, c’est-à-dire avec des queues relativement fines, nous devrions observer une fréquence limitée d’évènements extrêmes ; or, cette normalité ne serait pas respectée, avec une fréquence d’évènements extrêmes bien « trop » importante.

La non-normalité de la distribution sous-estimant le risque, l'effet de précaution devrait être augmenté. Gollier (2016 (55)) propose, pour la France, de retenir un taux sans risque de 2,5 % à 3 % (versus 3,43 % avec $r = \gamma\mu - \text{effet précaution}$).

14.1.5 Estimation du taux sans risque

Le rapport Quinet (2013 (11)) révisé cette valeur, et adopte un taux sans risque de 2,5 % jusqu'en 2070, et de 1,5 % pour les années suivantes.

Gollier (2016 (55)) suggère d'actualiser les flux à moins de 20 ans à un taux égal au double de la croissance anticipée de la consommation. Le taux sans risque décroît ensuite vers 1 % pour les flux les plus lointains (plus de 100 ans).

L'utilisation de taux bas devient plus générale parmi les analystes, en raison d'une meilleure compréhension des enjeux, mais aussi, plus conjoncturellement, en raison de l'expérience concrète de taux d'intérêt faibles.

14.2 Cadre théorique de la prime de risque

Le rapport Gollier (2011 (56)) souligne l'importance de la prise en compte du risque dans l'évaluation des projets d'investissement public. La méthodologie adaptée à la prise en compte du risque dépend du type de risque, et notamment de son ampleur ; de son caractère diversifiable, ou non ; de sa corrélation, ou non, à la croissance économique.

La valeur actualisée nette (VAN) espérée correspond à l'espérance des flux de coûts et bénéfiques du projet, actualisés à un taux sans risque. La justification de son utilisation s'appuie notamment sur le théorème d'Arrow-Lind : si un projet d'investissement public est marginal par rapport au PIB, et que son bénéfice net est indépendant de l'évolution de la richesse nationale, alors le coût du risque du projet tend vers zéro quand le nombre de contribuables tend vers l'infini. En d'autres termes, l'évaluation de projets d'investissements publics présentant un risque marginal, non-corrélé au PIB et réparti sur un nombre important d'agents économiques devrait être actualisée au taux sans risque. Ces conditions, et donc leurs conséquences, peuvent être vues comme discutables pour le projet global Cigéo. Il convient dès lors d'appliquer une « prime de risque ». Deux méthodes se présentent alors.

La première est celle de la prime de risque « au numérateur », qui est justifiée dès lors que le risque du projet est corrélé à la croissance économique. En effet, il est légitime de penser que la collectivité préfère un projet contra-cyclique (c'est-à-dire pouvant fonctionner en tant qu'« assurance » en cas de ralentissement ou de récession économique), aux projets pouvant aggraver les conséquences d'une crise.

On se réfère alors à la formule suivante du taux sans risque :

$$r_f = \gamma\mu + \delta$$

Où, dans la formule de Ramsey, γ (gamma) est l'aversion au risque, μ (mu) est le taux de croissance de l'économie et δ (delta) est la préférence pure pour le présent (appelée aussi taux d'impatience).

Dès lors si $E[X_t]$ correspond à l'espérance « classique » de la VAN en période t ; γ au coefficient d'aversion relative pour le risque ; $E[C_t]$ la consommation attendue de la société en période t .

Ainsi, il est aisé de voir que

- si $cov(X_t, C_t) = 0$, (les bénéfiques du projet ne sont pas corrélés à la croissance économique) nous sommes de retour à $E[X_t]$, l'espérance « classique » de la VAN ;
- si $cov(X_t, C_t) > 0$, c'est-à-dire si la corrélation entre le risque du projet et le risque macroéconomique est positive, un coût supplémentaire est ajouté au projet ;

- si $cov(X_t, C_t) < 0$, c'est-à-dire si la corrélation entre le risque du projet et le risque macroéconomique est négative, un bénéfice supplémentaire est ajouté ;
- plus γ (l'aversion au risque) est élevée, plus la prime de risque sera élevée pour un projet pro-cyclique (contra-cyclique).

On note toutefois qu'une limite majeure de ce type d'approximation est de n'être valide mathématiquement que dans un cadre de risque gaussien, ce qui exclut en pratique les distributions de risque à valeurs extrêmes ; si le risque portant sur les bénéfices nets du projet est au contraire non-marginal (5-10 % du PIB), cette approche peut conduire à sous-estimer le risque de manière considérable.

La seconde méthode, est celle de la prime de risque « au dénominateur ». Elle correspond à une majoration du taux d'actualisation. Si l'on note r_f le taux sans risque, et r le système d'actualisation comprenant le taux sans risque et la prime de risque, alors la prise en compte du risque au dénominateur revient à remplacer :

$$e^{-r_f t} [E[X_t]] - \frac{\gamma}{E[C_t]} cov(X_t, C_t), \text{ pour une approche au numérateur, par :}$$

$$e^{-rt} [E[X_t]]$$

Où $r = r_f + \beta\varphi$ est le taux d'actualisation ; r_f est le taux sans risque et $\beta\varphi$ est la prime de risque. Cette prime de risque comprend :

- β (« bêta socioéconomique »), qui représente la corrélation entre les coûts et les bénéfices du projet et le risque macroéconomique (si quand la croissance baisse, les flux du projets baissent, le projet est pro-cyclique et β est proche de 1 ; si au contraire, quand la croissance baisse, le projet permet de contrer les effets de cette baisse, alors le projet est contra-cyclique, et le β peut être négatif) ;
- et $\varphi = \gamma\sigma^2$ représente à la fois l'aversion au risque (γ), la volatilité macroéconomique (σ^2).

On comprend alors que :

- si aucune volatilité macroéconomique n'existe (peu réaliste, ou dans le cas où la société tend vers un comportement neutre au risque), φ est égal à (tend vers) 0, et le système d'actualisation est égal au (tend vers le) taux sans risque ;
- si aucune corrélation entre le projet et le risque macroéconomique n'existe, $\beta = 0$ et le système d'actualisation est de nouveau égal au taux sans risque ;
- si la corrélation entre le projet et le risque économique est parfaite, $\beta = 1$; les bénéfices du projet augmentent de 1 % dès que le PIB augmente de 1 %.

De manière similaire à la prise en compte du risque au numérateur, un projet contra-cyclique se verra ainsi attribuer une prime sous forme d'une minoration du taux d'actualisation, soit donc une valorisation plus haute des coûts ou bénéfices futurs, là où un projet positivement corrélé à l'évolution du PIB se verra minorer ses coûts ou ses bénéfices futurs, par le biais d'une majoration du taux d'actualisation.

Le rapport Quinet (2013 (11)) reprend les conclusions principales du rapport Gollier (2011 (56)) et soutient le besoin d'intégrer une prime de risque systémique. La méthodologie avancée par le rapport Quinet (2013 (11)) correspond à une méthodologie « au dénominateur », qui présente l'avantage d'une simplicité de mise en place. La prime de risque est fixée à 2 % jusqu'en 2070, puis à 3 % au-delà.

» TERME CORRECTEUR POUR LE CALCUL DES ESPÉRANCES DE COÛTS ET DE BÉNÉFICES

Pour les dépenses indexées au PIB, la formule issue des modèles de Ramsey enrichis par la prise en compte du risque est insuffisante en théorie.

Des correctifs apparaissent lorsque des dépenses sont corrélées à la consommation.

Le cadre de Ramsey permet cependant des expressions détaillées des taux d'actualisation d'un projet dont l'élasticité au revenu est paramétrée.

Le paramètre clé est β , c'est-à-dire l'élasticité au revenu, ou de manière équivalente le paramètre d'indexation.

Un exemple complet d'application peut être trouvé dans Dietz, Gollier et Kessler (2018 (157)) et le principe pourrait en être employé dans l'évaluation du projet global Cigéo.

Outre le taux sans risque comprenant la prime de risque systématique, des termes s'ajoutent.

Ces termes additionnels sont nuls pour $\beta = 0$, et ils tendent à réduire le taux d'actualisation si $\beta > 0$.

Il s'agit d'une prime de risque additionnelle, spécifique au projet en raison de son β .

Le taux d'actualisation recommandé serait alors :

$$r_f - \beta\mu + \beta\gamma\sigma^2 - \frac{1}{2}\beta^2\sigma^2$$

Le second terme n'est que l'indexation déterministe des dépenses, mise ici au dénominateur au lieu du numérateur, selon la distinction du rapport Quinet.

La difficulté est que le modèle de Ramsey n'est pas cohérent avec les primes empiriques de risque systématique. Gollier le remarque dans sa contribution au rapport Quinet (2013 (11)).

Il a été choisi dans cette évaluation socioéconomique de privilégier des valeurs cohérentes avec l'expérience historique pour les premières grandes périodes de chaque scénario, et non de se fier étroitement aux prescriptions du modèle de Ramsey. Dès lors, l'extrapolation par le modèle de Ramsey enrichi de termes supplémentaires est fragile.

Il est délicat de le réhabiliter à la virgule près pour des termes mal connus alors qu'il est écarté pour des termes classiques. Par ailleurs, les valeurs des termes correcteurs ne sont pas très importantes. Certes, ils font baisser un taux d'actualisation qui tend déjà à être très bas à long terme.

Le problème essentiel serait que les VAN ne convergent pas s'il y a des coûts récurrents perpétuels. Ce cas reste hypothétique. Le choix de taux d'actualisation synthétiques par grandes périodes, et selon les *scenarii*, est retenu.

Annexe 15 Détails des coûts et représentations graphiques de l'option de projet 1

15.1 Hypothèses de l'option de projet 1

Tableau Annexe 15.1-1 Solutions de gestion de l'option de projet 1

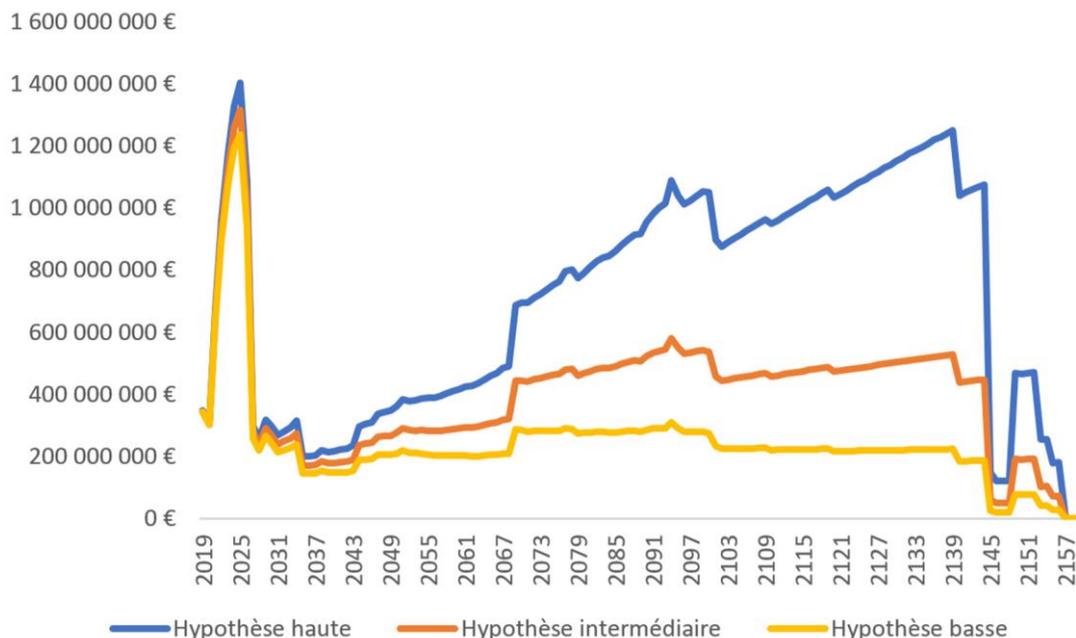
Option	Solution de gestion pour les MA-VL	Solution de gestion pour les HA
Option de projet 1	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond

Tableau Annexe 15.1-2 Hypothèses de l'option de projet 1

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité Jusqu'en 2170, puis au-delà
Conception, construction, exploitation et fermeture de Cigéo	2019-2156	25 811 M€	80 %-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2030-2040			
Dont stockage MA-VL	2040-2100			
Dont stockage HA	2080-2145			
Transport	2030-2145	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour phase industrielle pilote et stockage MA-VL	2030-2095	1 387 M€		
Dont pour stockage HA	2080-2145	215 M€		
GIP	2019-2025	420 M€ (60 M€/an)		

15.2 Coût de l'option de projet 1 avec prise en compte des prix relatifs

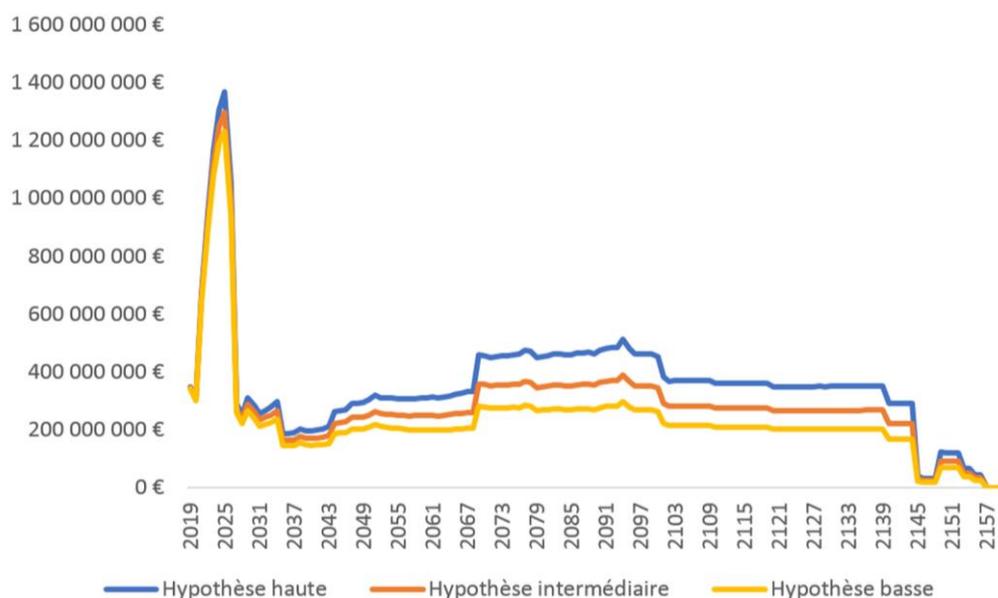
15.2.1 Approche déterministe, scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0026-A

Figure Annexe 15.2-1 Coût de l'option de projet 1, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK

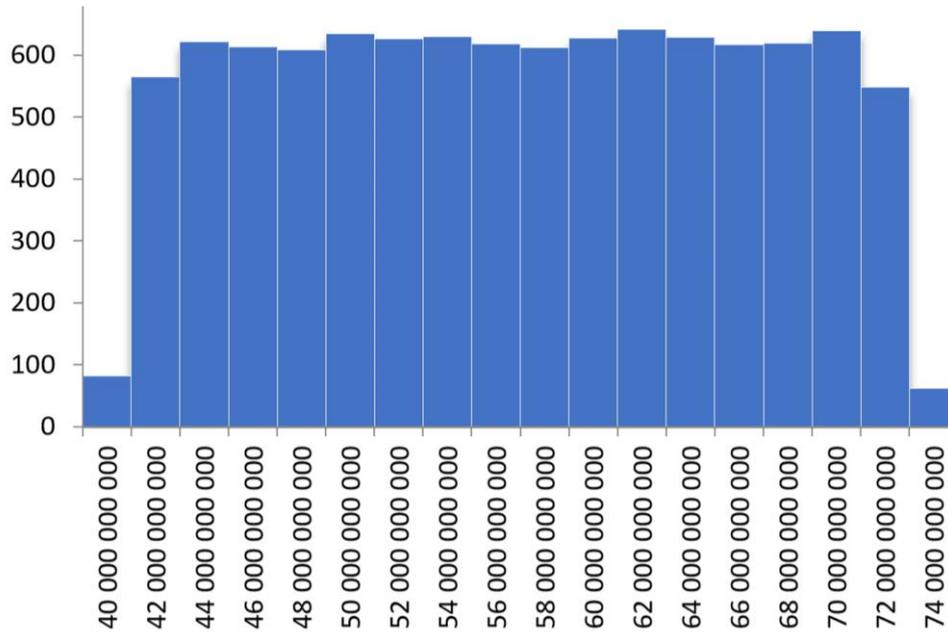
15.2.2 Approche déterministe, scénario KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0025-A

Figure Annexe 15.2-2 Coût de l'option de projet 1, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO

15.2.3 Approche probabiliste non actualisée, scénario OK

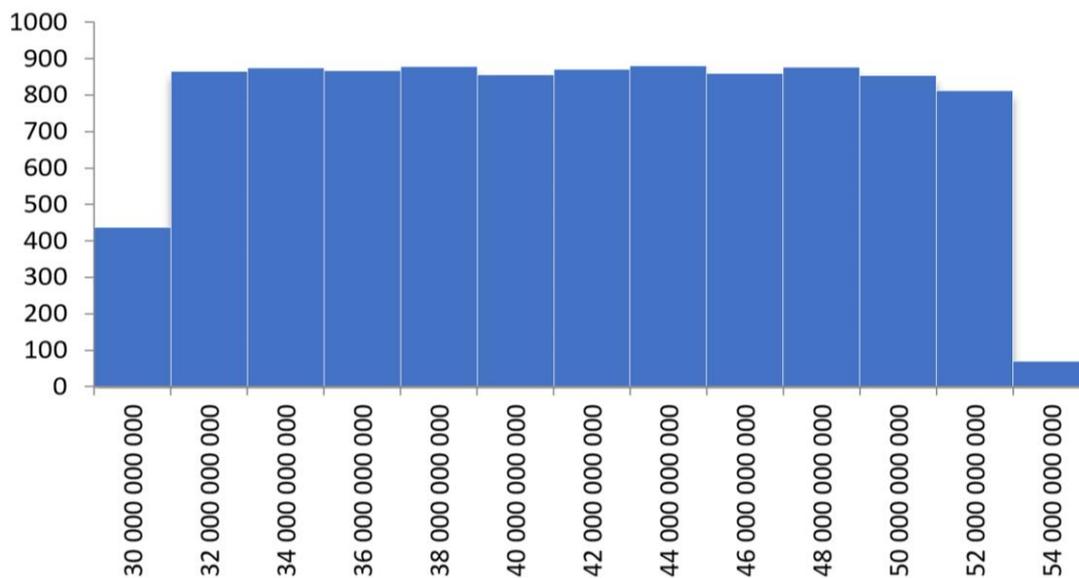


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0072-B

Figure Annexe 15.2-3 Distribution du coût de l'option de projet 1 (Cigéo) en tenant compte des prix relatifs, issue d'une simulation de Monte-Carlo, dans le scénario OK et avant actualisation, en taux intermédiaire

15.2.4 Approche probabiliste non actualisée, scénario KO

En scénario KO, le coût moyen de l'option de projet 1 s'élève à 52 044 millions d'euros, avec un intervalle de confiance de 90 % compris entre 35 930 millions d'euros et 71 795 millions d'euros.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0073-B

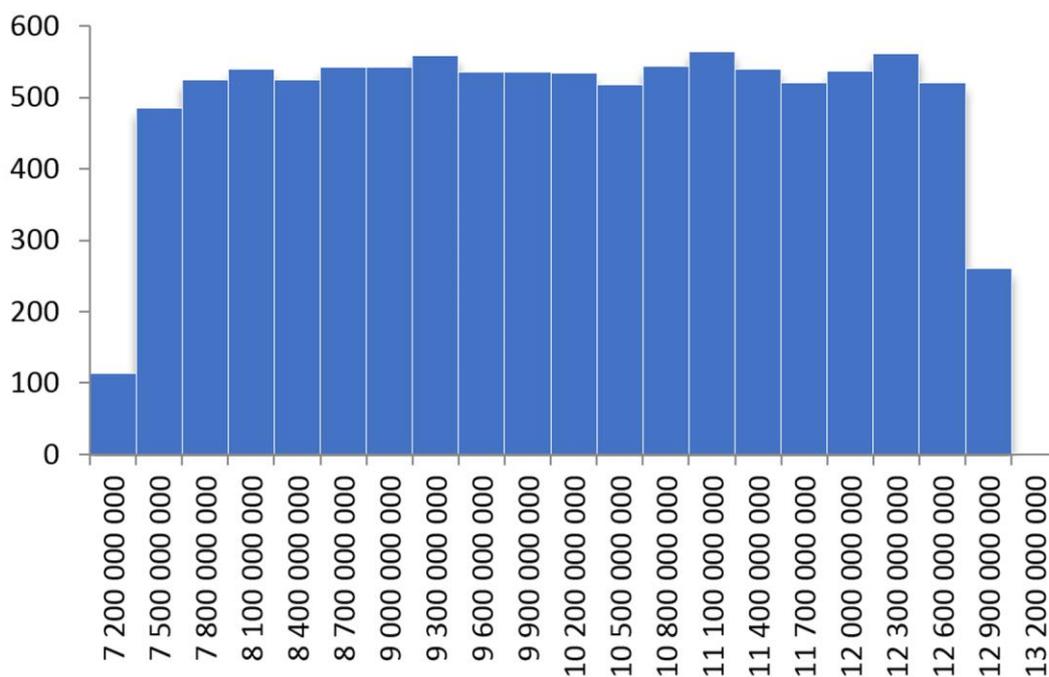
Figure Annexe 15.2-4 Distribution du coût de l'option de projet 1 (Cigéo) en tenant compte des prix relatifs, issue d'une simulation de Monte-Carlo, dans le scénario KO et avant actualisation, en taux intermédiaire

15.3 Coût actualisé de l'option de projet 1

15.3.1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

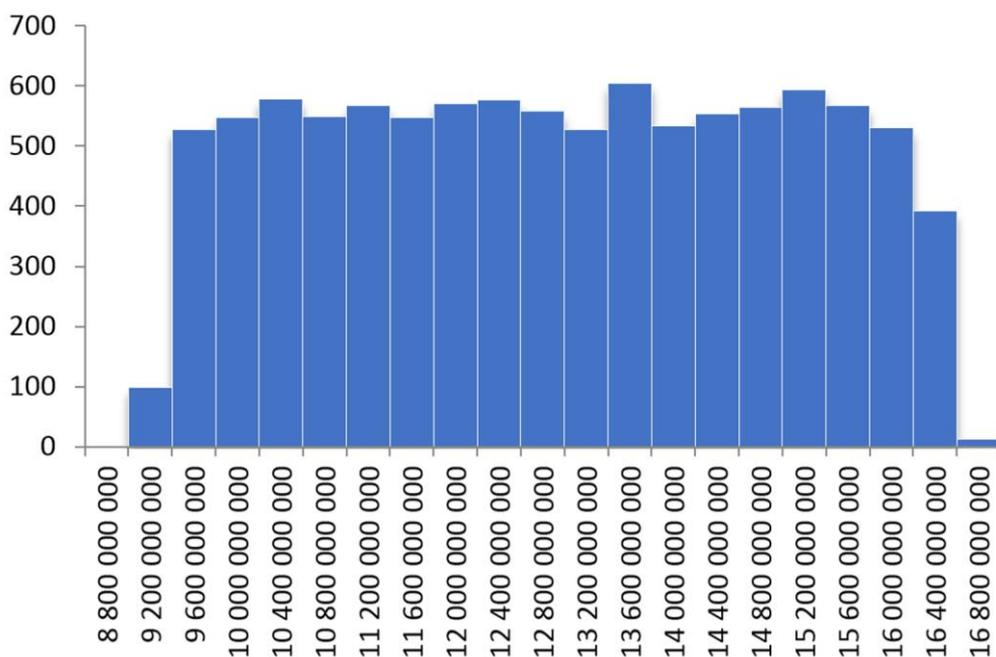
Tableau Annexe 15.3-1 Résultats actualisés de l'option de projet 1 en scénario OK

Option de projet 1 Scénario OK	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Taux d'actualisation haut	9 836 M€	1 592 M€	6 864 M€	12 752 M€	7 360 M€ ; 12 311 M€
Taux d'actualisation intermédiaire	12 544 M€	2 028 M€	8 807 M€	16 298 M€	9 389 M€ ; 15 695 M€
Taux d'actualisation bas	14 482 M€	2 348 M€	10 157 M€	18 780 M€	10 822 M€ ; 18 146 M€



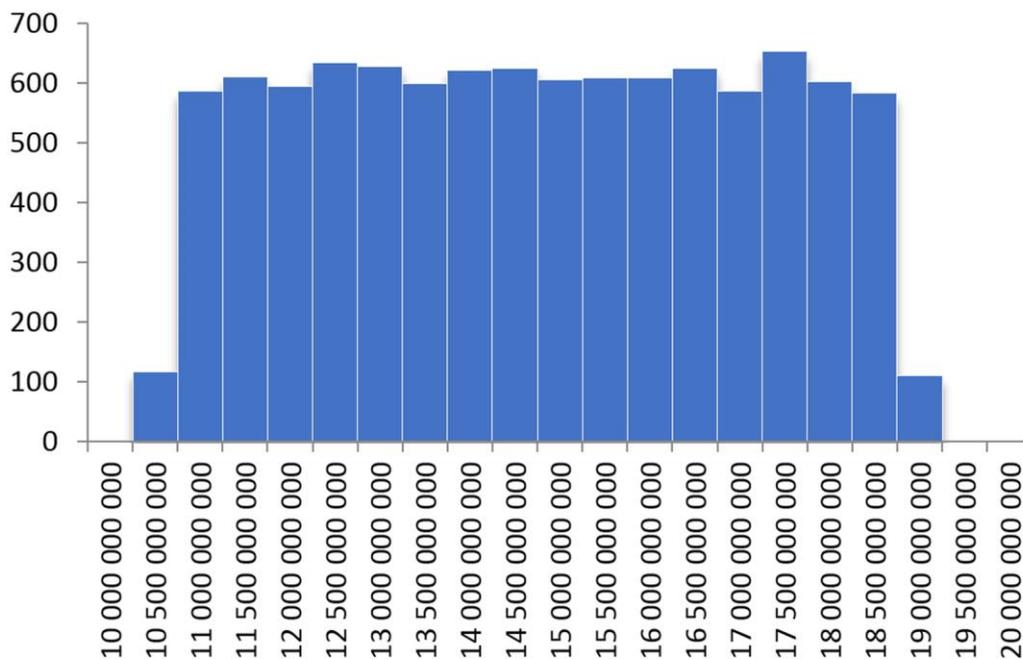
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0074-B

Figure Annexe 15.3-1 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0036-A

Figure Annexe 15.3-2 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK



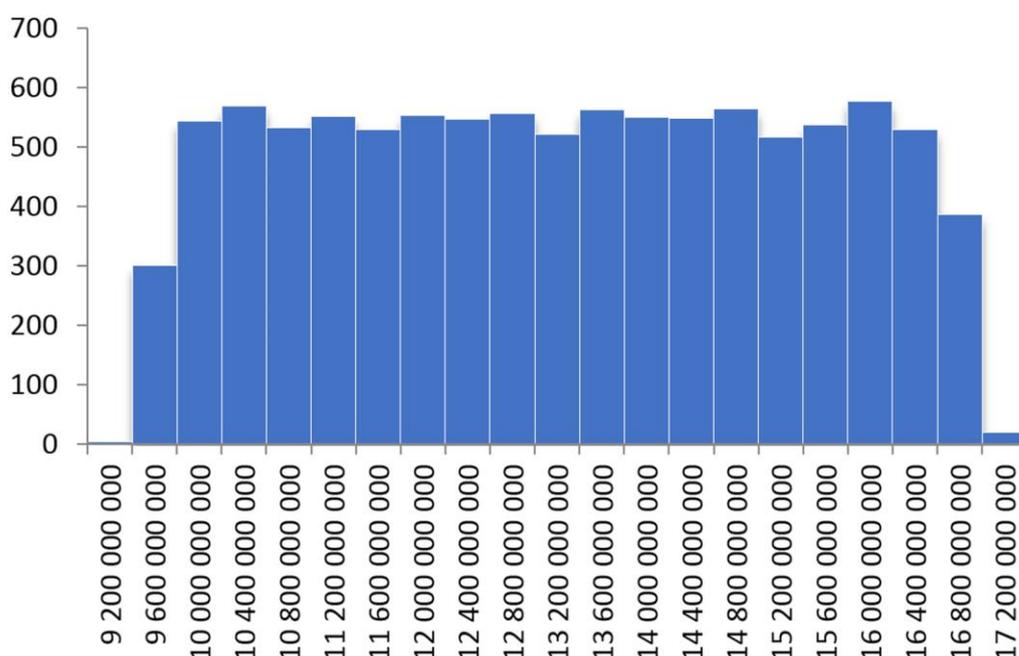
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0075-B

Figure Annexe 15.3-3 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK

15.3.2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO

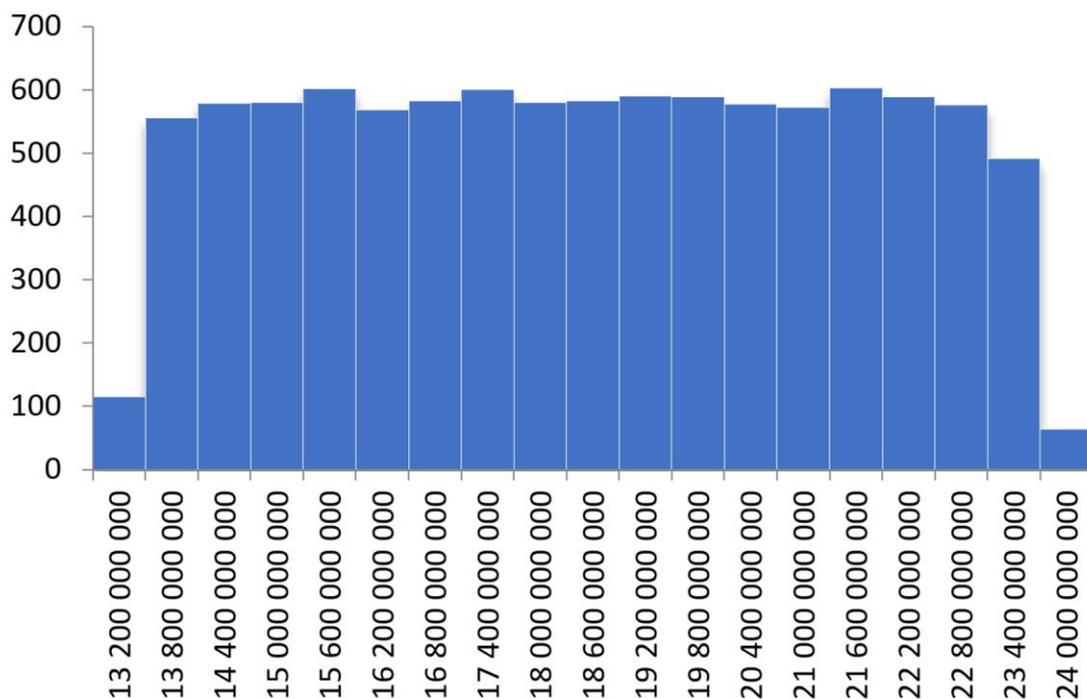
Tableau Annexe 15.3-2 Résultats actualisés de l'option de projet 1 en scénario KO

Option de projet 1 Scénario KO	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 %;95 %]
Taux d'actualisation haut	11 646 M€	1 883 M€	8 133 M€	15 134 M€	8 727 M€ ; 14 566 M€
Taux d'actualisation intermédiaire	16 741 M€	2 719 M€	11 721 M€	21 716 M€	12 503 M€ ; 20 976 M€
Taux d'actualisation bas	22 835 M€	3 632 M€	15 938 M€	29 705 M€	17 027 M€ ; 28 636 M€



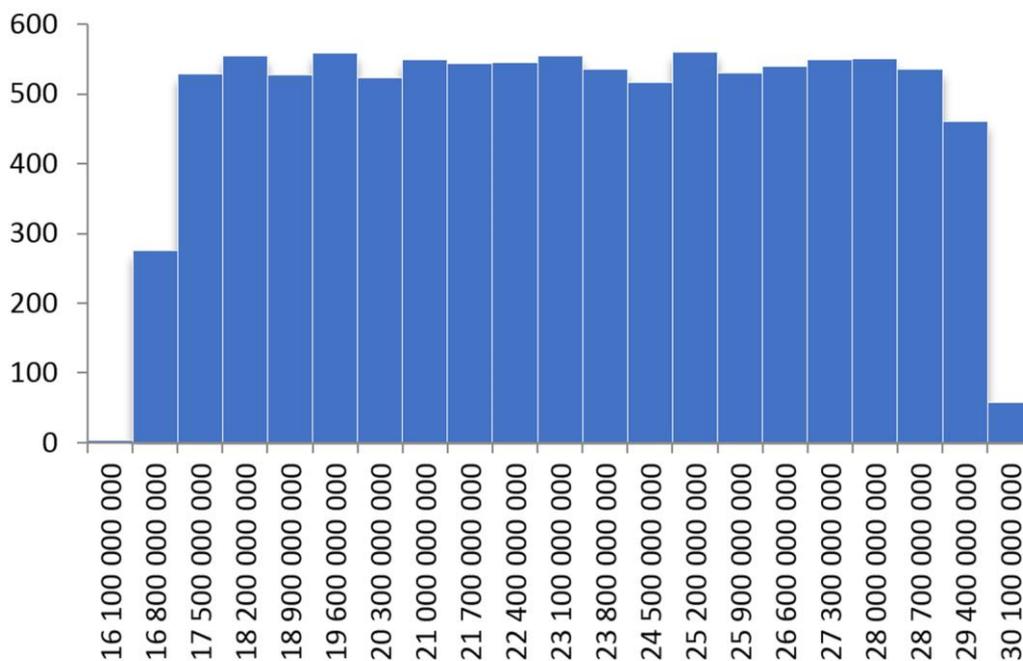
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0076-B

Figure Annexe 15.3-4 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0037-A

Figure Annexe 15.3-5 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0077-B

Figure Annexe 15.3-6 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO

Annexe 16 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 2

16.1 Hypothèses de l'option 2

Tableau Annexe 16.1-1 Solutions de gestion de l'option 2

Branches de l'option 2	Solution de gestion pour les MA-VL	Solution de gestion pour les HA
Branches 2.1.a et 2.2	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Branche 2.1.b	Stockage géologique profond	Technologie prospective (forage profond)

Tableau Annexe 16.1-2 Hypothèses de l'option 2 - Branches 2.1.a et 2.2

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁸⁹
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2019-2156	25 811 M€	80 %-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2030-2040			
Dont stockage MA-VL	2040-2100			
Dont stockage HA	2080-2145			
Transport	2030-2145	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour phase industrielle pilote et stockage MA-VL	2030-2095			
Dont pour phase industrielle pilote et stockage HA	2080-2145			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
GIP	2019-2025	420 M€		
R&D	2019-2069	3 570 M€		
Recherche de site	2019-2069	1 653 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0

⁸⁹ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Tableau Annexe 16.1-3Hypothèses de l'option 2 - Branche 2.1.b

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁰
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2019-2109	15 110 M€	80 % - 150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2030-2040			
Dont stockage MA-VL	2040-2100			
Dont stockage HA	N/A			
Transport	2030-2155	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour phase industrielle pilote et stockage MA-VL	2030-2095			
Dont pour stockage HA	2091-2155			
GIP	2019-2025	420 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	3 570 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2088	6 294 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€		
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€		
Technologie prospective	2086-2155	11 637 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont constructions annexes	2086-2090	1 086 M€		
Dont mise en forage HA	2091-2155	9 940 M€		
Entreposage	2080-2155	48 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1

⁹⁰ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

16.2 Coûts unitaires de l'option 2

16.2.1 Coût de mise en place de Cigéo

Pour mémoire, les coûts de mise en place de Cigéo comprennent plusieurs types de dépenses :

- investissement ;
- fonctionnement ;
- assurances, maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage ;
- fiscalité ;
- activités connexes sous maîtrise d'ouvrage Andra.

L'option 2 se distingue de l'option de projet 1 à compter de 2070. De ce fait, les coûts de mise en place de Cigéo sont identiques à ceux de l'option de projet 1 jusqu'à cette date et ce, quelle que soit la branche considérée de l'option 2.

Au-delà de 2070, si les branches 2.1.a et 2.2 restent identiques à l'option de projet 1, des modifications sont requises dans la branche 2.1.b. Ces modifications sont les suivantes :

- investissement et fonctionnement : suppression des montants qui concernent le stockage des déchets HA, et notamment dans les catégories suivantes :
 - ✓ coût d'investissement relatif au process nucléaire : suppression des coûts liés au process des colis HA post 2070 ;
 - ✓ coût d'investissement relatif au bâtiment nucléaire de surface : retrait des coûts de la construction de l'EP2⁹¹ ;
 - ✓ coût d'investissement relatif aux installations conventionnelles de surface : raccourcissement de la période de fonctionnement, le stockage des MA-VL s'effectue entre 2040 et 2100, avancement de la fermeture, avec économie sur les coûts de jouvence (moins de bâtiments concernés) et sur les coûts de démantèlement, qui sont avancés entre 2100 et 2110 au lieu de 2145 et 2155 ;
 - ✓ coût d'investissement relatif aux liaisons surface-fond et ouvrages souterrains : suppression des coûts liés aux zones de stockage HA après 2070 et avancement des coûts de démantèlement à 2100 au lieu de 2145 ;
 - ✓ coût d'investissement relatif aux installations transverses : avancement des coûts liés au démantèlement à 2100 au lieu de 2145 ;
 - ✓ coût d'investissement relatif aux utilités externes : pas de changement ;
 - ✓ coût d'investissement relatif aux conteneurs de stockage : pas de changement ;
 - ✓ coût d'investissement relatif au système de transfert surface-fond des hottes : suppression des coûts de jouvence post 2100 et avancement des coûts de démantèlement à 2100 au lieu de 2145 ;
- maîtrise d'œuvre, assistance à maîtrise d'ouvrage réglementaire et maîtrise d'ouvrage : nous appliquons les mêmes pourcentages mais sur la base d'une assiette différente, qui correspond au montant d'investissement post 2070 ;
- assurance : nous n'appliquons pas de modification du montant mais raccourcissons la période. À partir de 2110, les travaux sont terminés et le site fermé (au lieu de 2155 dans l'option de projet 1) ;
- coûts de fonctionnement : ils sont inchangés jusqu'en 2070 qui est par ailleurs le pic des dépenses de fonctionnement dans l'option de projet 1, puis nous posons l'hypothèse que ces coûts décroissent linéairement jusqu'à 0 en 2100, année de la fin de fonctionnement (hors conteneurs de stockage MA-VL et assurances exploitation) ;

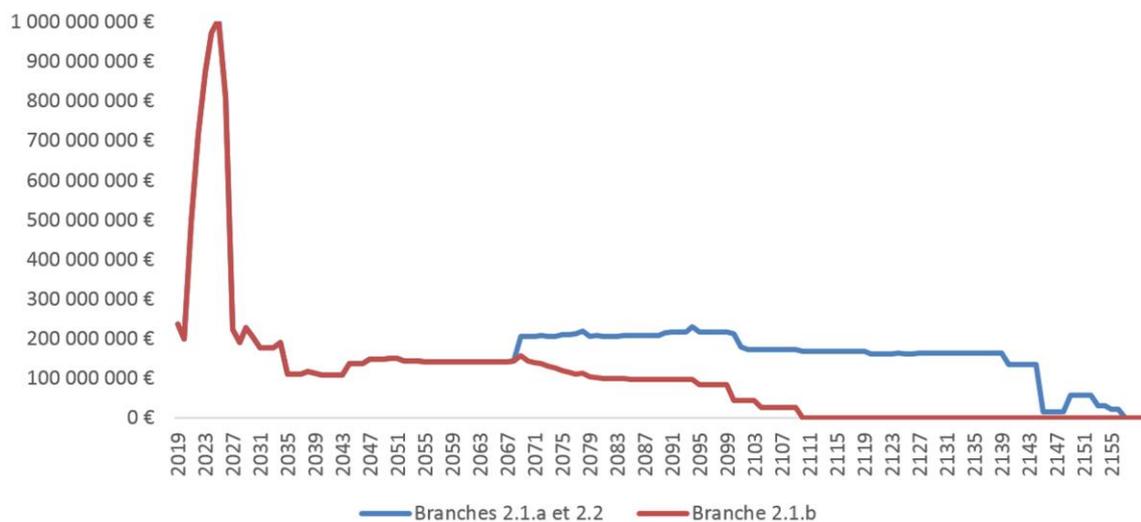
⁹¹ Dans l'option 1, l'EP2 est construit en 2069. On pose l'hypothèse que si une technologie prospective est trouvée et dispose d'un site, l'investissement dans l'EP2 ne sera pas réalisé. Cela explique qu'il n'y ait pas précisément le même montant dans la branche commune (avant 2070).

- impôts et taxes : le niveau moyen des impôts et des taxes pour la période pendant laquelle seuls les déchets MA-VL sont stockés (2040-2080), soit 34 millions d'euros par an, est répété pour les années 2070 à 2100 ;
- pas de changement pour les activités sous maîtrise d'ouvrage Andra qui ne vont de toute façon que jusqu'en 2034.

Le Tableau Annexe 16.2-1 résume l'ensemble des coûts relatifs à Cigéo dans les branches de l'option 2, puis la Figure Annexe 16.2-1 en représente les flux dans le temps.

Tableau Annexe 16.2-1 Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 2, en M€₂₀₁₉

Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 2			
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective	
Typologie de coût	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b	
Investissement et fonctionnement	19 333 M€	10 567 M€	8 198 M€
Assurance travaux, maîtrise d'œuvre/ d'ouvrage, impôts et taxes	5 352 M€	3 417 M€	2 303 M€
Autres activités (Andra)	1 125 M€	1 125 M€	1 125 M€
Coût brut total	25 811 M€	15 110 M€	11 627 M€



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0085-B

Figure Annexe 16.2-1 Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour les branches de l'option 2

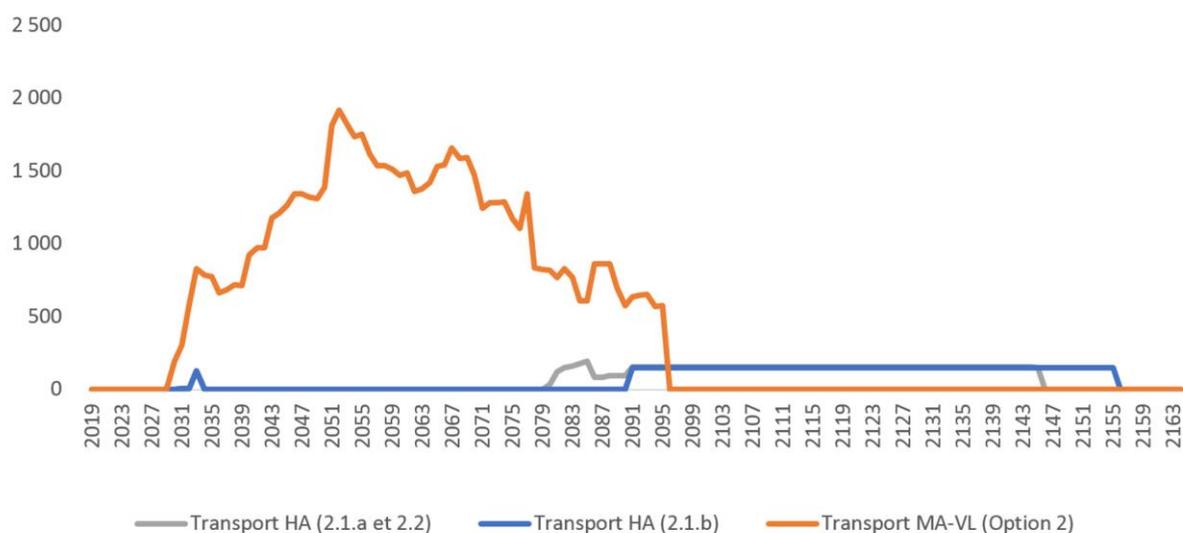
16.2.2 Coût de transport

Pour le transport des déchets MA-VL, le site de destination de l'option 2 reste conforme à ce qui est prévu dans l'option de projet 1 : quelle que soit la branche, les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond et sont transportés vers le centre de stockage Cigéo sans modification de la période de stockage de 2040 à 2100, précédés d'une phase industrielle pilote de 2030 à 2040. Les déchets sont donc transportés, comme dans l'option de projet 1, entre 2030 et 2095.

Pour le transport des déchets HA, le site de destination de l'option 2 et la période de stockage varient selon la branche considérée :

- Dans la branche 2.2 (où aucune technologie prospective pour gérer les déchets HA n'est trouvée avant 2070) et dans la branche 2.1.a (où une technologie prospective est trouvée pour gérer les déchets HA avant 2070, mais s'avère plus coûteuse que le stockage géologique), le transport des déchets HA s'effectue vers le centre de stockage Cigéo entre 2080 et 2145, de manière identique à ce qui intervient dans l'option de projet 1.
- Dans la branche 2.1.b (où une technologie prospective apparaît pour gérer les déchets HA avant 2070, où un site est trouvé et où le coût de la technologie prospective s'avère moins élevé que le stockage géologique), il serait alors nécessaire de transporter les déchets HA vers le lieu où la technologie prospective est implantée. Par simplification, étant donné qu'il est impossible d'anticiper le lieu d'implantation de la technologie prospective, les coûts de transports ainsi que les chroniques de livraison associées à cette technologie prospective sont considérés identiques à ceux du transport vers le centre de stockage Cigéo. Cette hypothèse conservatrice se justifie notamment par le fait que les coûts de transport utilisés dans ce rapport ne sont pas exprimés en euros par kilomètres parcourus mais en euros par m³ de déchets transportés. Ainsi, peu importe la destination finale des déchets depuis leur site d'entreposage, ce rapport considère que les coûts de transport sont les mêmes.

À noter toutefois qu'une différence intervient dans le coût du transport entre les branches 2.1.a et 2.2 (qui sont similaires à l'option de projet 1 du projet Cigéo) et la branche 2.1.b, du fait de l'actualisation. Si, en effet, le coût brut est identique entre les options 1 et 2, la chronique de transport des déchets diffère et impacte donc le coût actualisé : dans la branche 2.1.b, les déchets HA sont stockés entre 2091 et 2155, et non entre 2080 et 2145, comme c'est le cas dans les branches 2.1.a et 2.2 (similaires à l'option de projet 1 du projet Cigéo), ce qui impacte le coût actualisé à la baisse.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0087-B

Figure Annexe 16.2-2 Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans l'option 2, en m³

Tableau Annexe 16.2-2 Coût brut de transport dans l'option 2, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de transport dans l'option 2			
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective	
Typologie de coût	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b	
Coût de transport des déchets MA-VL	1 241 M€	1 241 M€	846 M€
Coût de transport des déchets HA	231 M€	231 M€	3 M€
Coût brut total	1 472 M€	1 472 M€	850 M€

16.2.3 Coût d'entreposage

Si une technologie prospective est trouvée et mise en place (branche 2.1.b), le stockage des déchets HA s'effectue entre 2091 et 2155, au lieu d'être effectué entre 2080 et 2145 au sein de Cigéo (branche 2.1.a). On note alors un **décalage de 10 ans** de l'année de début de la mise en stockage des déchets HA, se traduisant par une **prolongation de 10 ans de la période d'entreposage**.

Tableau Annexe 16.2-3 Surcoût brut d'entreposage des déchets HA dans l'option 2 relativement celui de l'option de projet 1, en millions d'euros₂₀₁₉

Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective
Typologie de coût	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b
Surcoût de fonctionnement	0 M€	48 M€
Surcoût d'investissement	0 M€	(négligeable)
Surcoût brut total	0 M€	48 M€

Si aucune technologie prospective n'est trouvée (branche 2.2), alors le stockage des déchets HA et MA-VL dans Cigéo se fait avec un calendrier identique à celui de l'option de projet 1, sans surcoût d'entreposage (par rapport au coût d'entreposage de l'option de projet 1).

16.2.4 Coût de recherche de site

L'option 2 ne comprend pas de coût de recherche de site pour les déchets MA-VL, car ceux-ci sont stockés dans Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne quelle que soit la branche.

L'option 2 comprend un coût de recherche de site pour les déchets HA dans les trois branches, en lien avec la recherche d'une technologie prospective :

- ainsi, la phase 1 de recherche de site, correspondant à la période initiale d'identification du site (période de 23 ans dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne, intervenue entre 1983 et 2006) est enclenchée dans l'ensemble des branches ;
- ensuite, à partir de 2070, les dépenses de recherche de site divergent selon le résultat de la recherche d'une technologie prospective (fructueux/non fructueux) et l'arbitrage de coût entre les deux technologies (stockage profond versus forage profond) :
 - ✓ à cette date, si une technologie prospective et un nouveau site sont identifiés, la phase 2 de recherche de site, correspondant à la caractérisation du site pour la technologie considérée (période de 19 ans dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne, intervenue depuis 2007, jusqu'au décret d'autorisation de création), peut être enclenchée : c'est le cas de la branche 2.1.b ;
 - ✓ dans les deux autres branches, cette phase n'est pas enclenchée car elle n'est pas utile, soit par défaut de site identifié et/ou de technologie (branche 2.2), soit en raison de l'arbitrage budgétaire du décideur public en faveur du stockage profond et non du forage profond (branche 2.1.a).

Tableau Annexe 16.2-4 Coût brut de recherche de site dans l'option 2, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de recherche de site dans l'option 2			
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les HA		Technologie prospective	
Typologie de coût	Branches 2.1.a et 2.2	Branche 2.1.b	
Phase 1 d'identification du site	1 653 M€	1 653 M€	1 653 M€
Phase 2 de caractérisation du site	-	4 641 M€	-
Coût brut total	1 653 M€	6 293 M€	1 653 M€

16.2.5 Coût de R&D

Dans l'option 2 et quelle que soit l'issue de la recherche, la période de 2019 à 2070 est caractérisée par des dépenses de R&D pour trouver une technologie prospective pour les déchets HA, à hauteur de 70 millions d'euros par an.

16.2.6 La recherche n'est alors jugée fructueuse que si la technologie prospective trouvée est conforme au niveau de sûreté français et si un site est trouvé pour la recevoir. Coût d'une technologie prospective

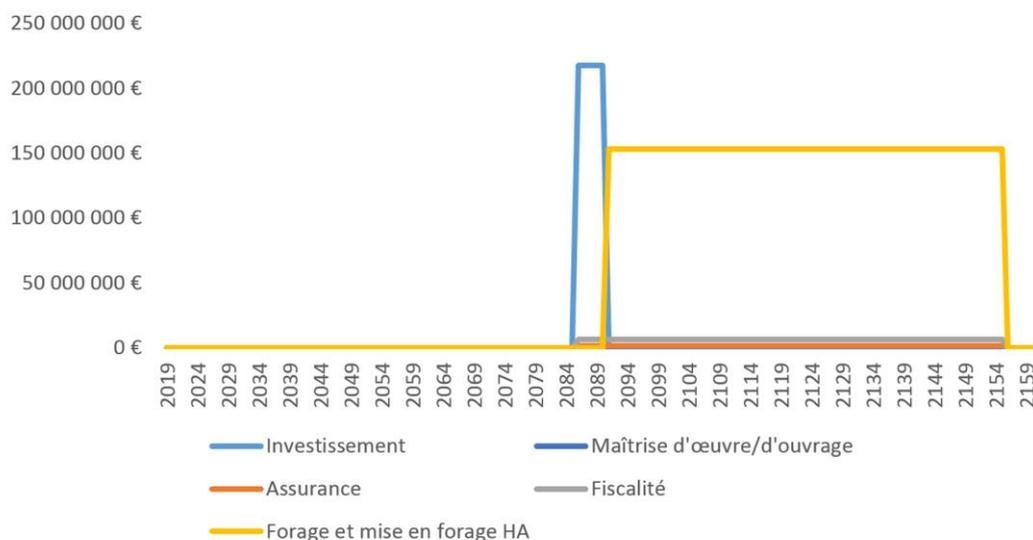
Au-delà de 2070, seules les branches 2.1.a et 2.1.b illustrent des situations où la technologie prospective est trouvée.

Cependant, dans la branche 2.1.a, cette technologie prospective n'est pas mise en place car elle est jugée plus coûteuse que le stockage géologique.

Dans la branche 2.1.b, cette technologie prospective est mise en place car elle est jugée moins coûteuse que le stockage géologique. Il convient donc d'ajouter le coût de la construction et de fonctionnement de cette technologie prospective pour les déchets HA. Le coût est composé d'une part de l'extrapolation

du coût estimé dans la thèse de Bates ; d'autre part, d'autres coûts d'investissement et annexes (cf. chapitre 5.1 du présent document).

La Figure Annexe 16.2-3 ci-après représente les chroniques des différentes catégories de coûts pour la mise en place de la technologie prospective utilisée pour les déchets HA.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0088-B

Figure Annexe 16.2-3 Chronique des coûts unitaires bruts de technologie prospective pour les déchets HA, de la branche 2.1.b, en euros₂₀₁₉

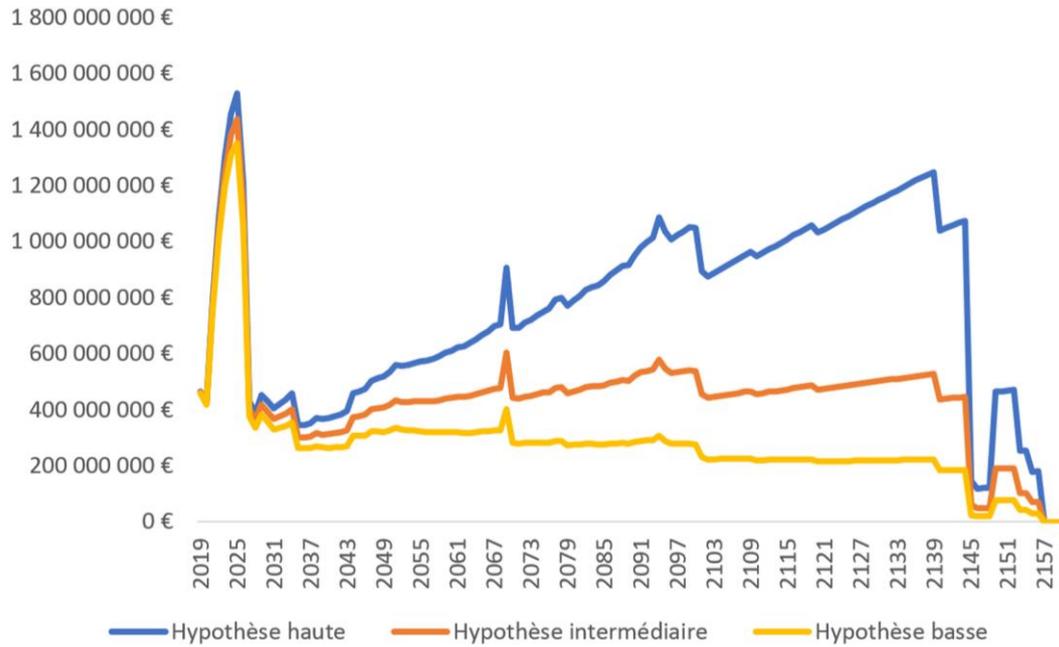
Le Tableau Annexe 16.2-5 résume les coûts qui seraient à engager dans la branche 2.1.b pour la mise en place de la technologie prospective utilisée pour les déchets HA.

Tableau Annexe 16.2-5 Coût brut de la technologie prospective dans l'option 2, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de la technologie prospective dans l'option 2	
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA	Technologie prospective
Typologie de coût	Branche 2.1.b
Forage et mise en forage	9 940 M€
Investissement (installations conventionnelles de surface ; liaisons surface-fond et ouvrages souterrains ; utilités externes et aménagements hors site)	1 086 M€
Maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage	60 M€
Fiscalité	452 M€
Assurance	100 M€
Coût brut total	11 637 M€

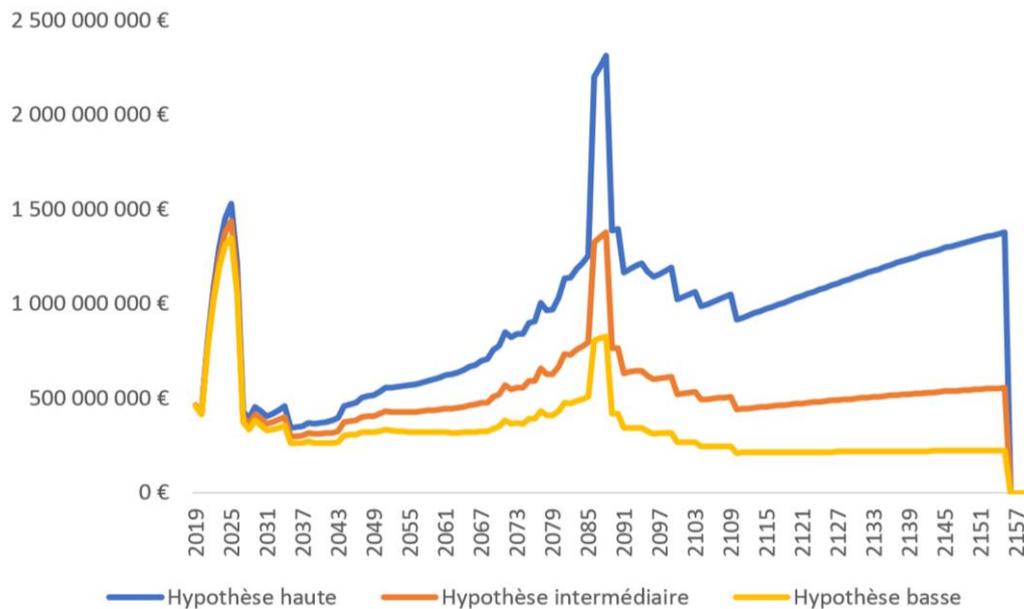
16.3 Coût de l'option 2 avec prise en compte des prix relatifs

Les chroniques présentées ci-dessous concernent l'approche déterministe des prix relatifs dans les branches distinctes de l'option 2.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0089-B

Figure Annexe 16.3-1 Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branches 2.1.a et 2.2, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0090-B

Figure Annexe 16.3-2 Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branche 2.1.b, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK

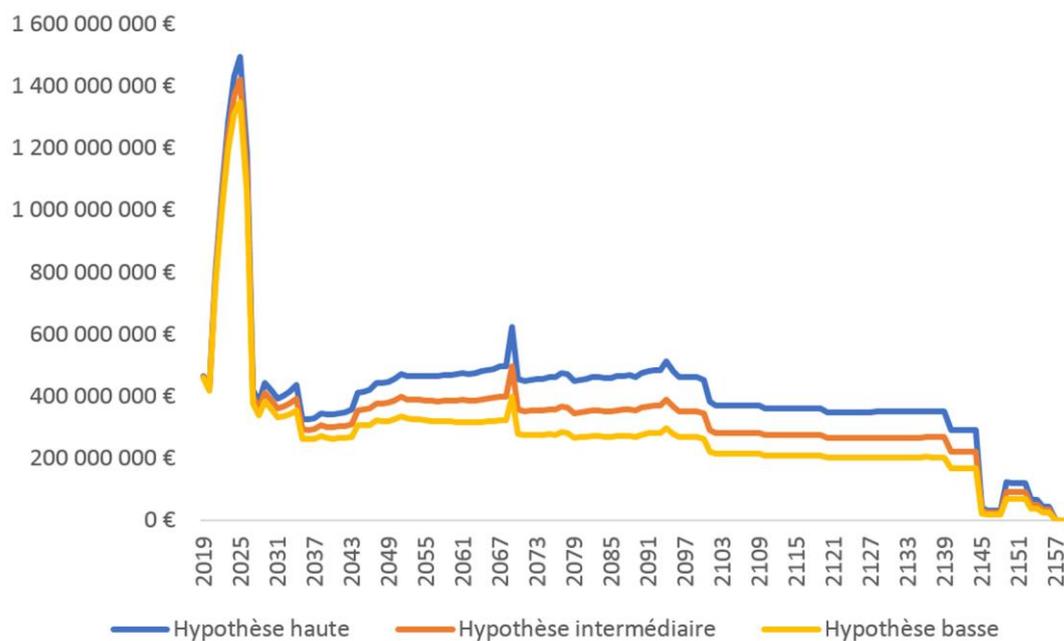


Figure Annexe 16.3-3 Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branches 2.1.a et 2.2, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO

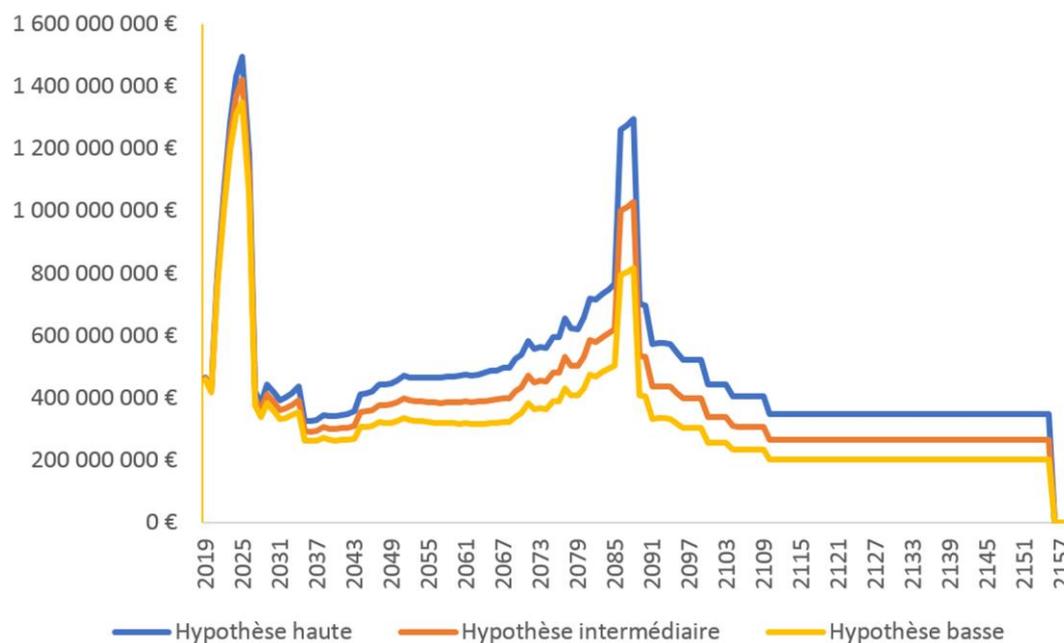


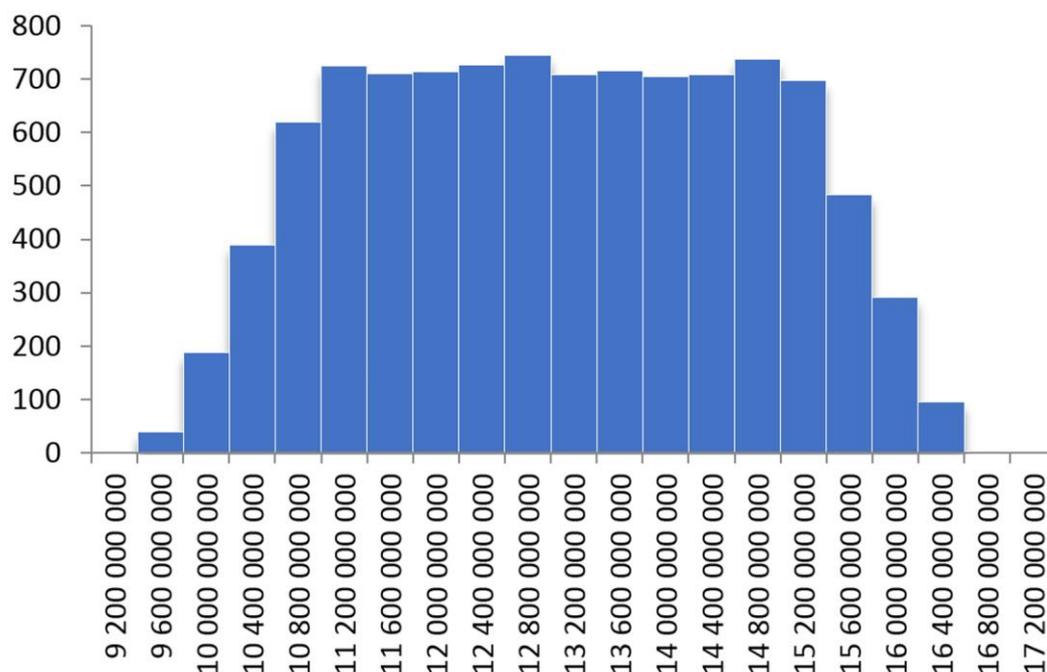
Figure Annexe 16.3-4 Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branche 2.1.b, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO

16.4 Coût actualisé de l'option 2

16.4.1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

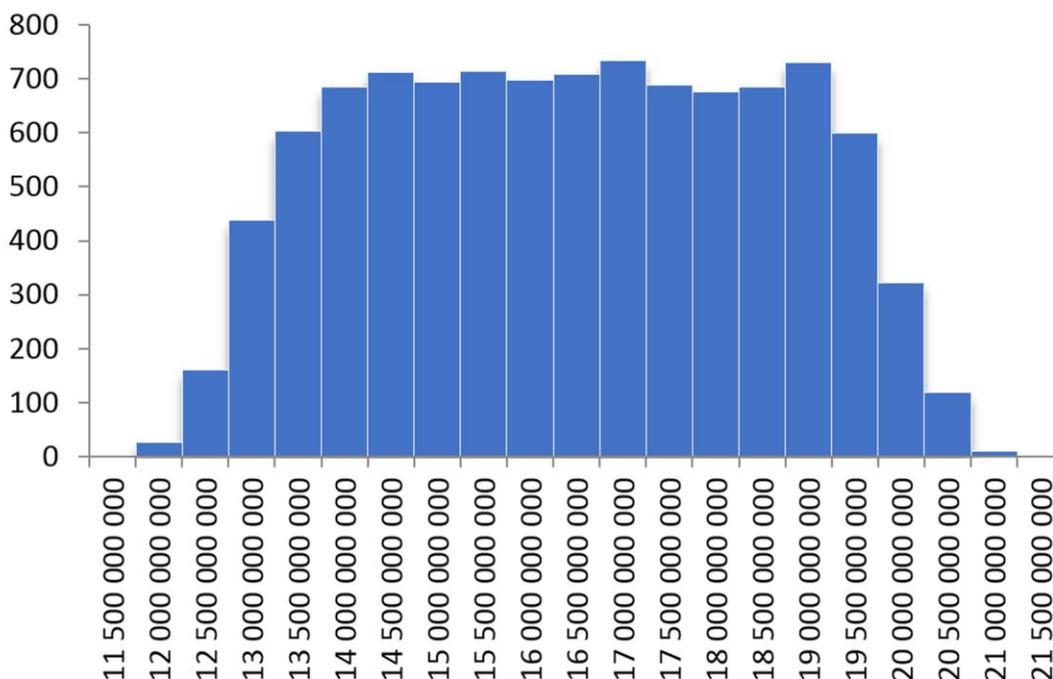
Tableau Annexe 16.4-1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

Option 2 Scénario OK	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	12 771 M€	1 640 M€	9 187 M€	16 345 M€	10 234 M€ ; 15 336 M€
Actualisation faible	18 225 M€	2 395 M€	13 099 M€	23 469 M€	14 501 M€ ; 21 952 M€
Actualisation intermédiaire	16 013 M€	2 080 M€	11 399 M€	20 498 M€	12 754 M€ ; 19 261 M€



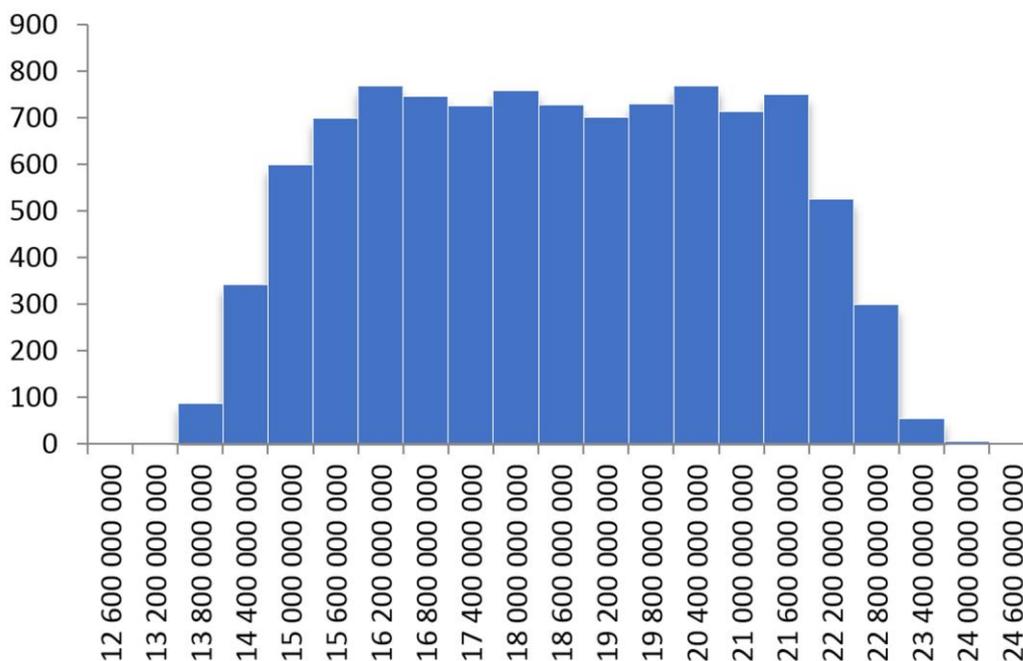
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0093-B

Figure Annexe 16.4-1 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0044-A

Figure Annexe 16.4-2 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK



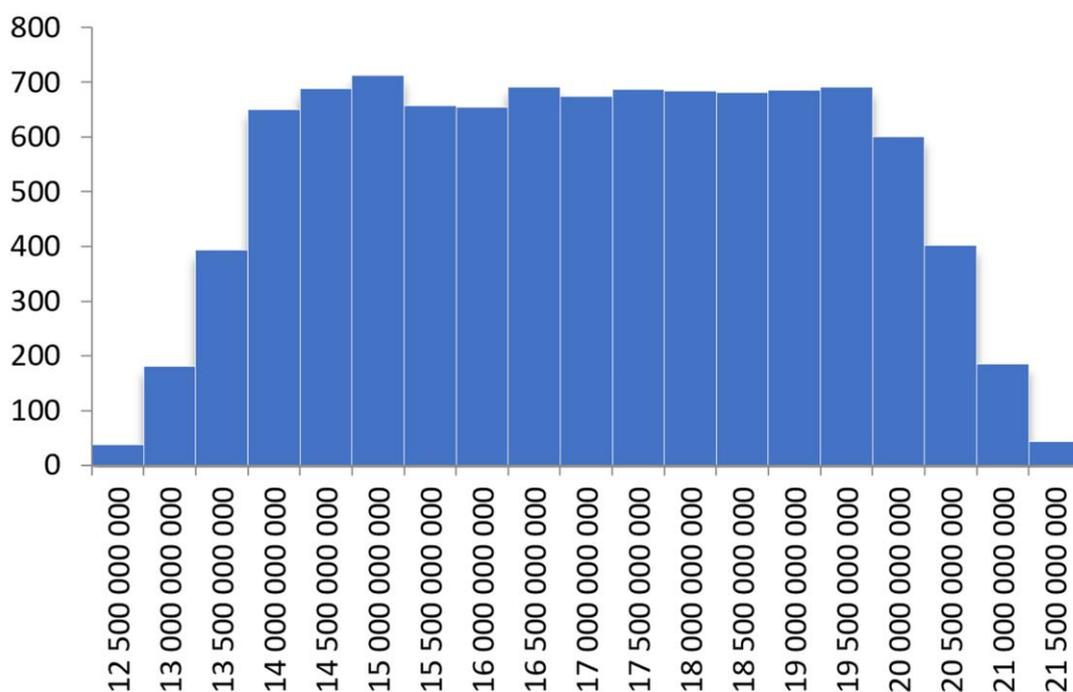
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0094-B

Figure Annexe 16.4-3 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK

16.4.2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO

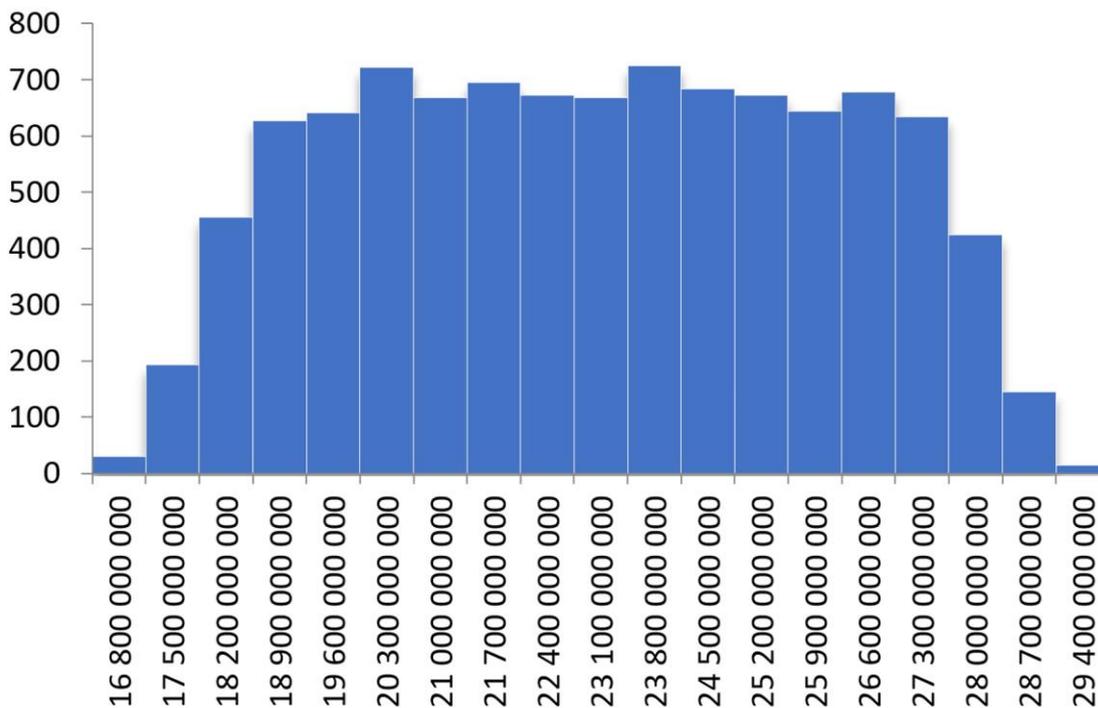
Tableau Annexe 16.4-2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO

Option 2 Scénario KO	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	15 140 M€	1 936 M€	10 854 M€	19 507 M€	12 111 M€ ; 18 156 M€
Actualisation faible	27 726 M€	3 783 M€	19 666 M€	35 639 M€	21 814 M€ ; 33 599 M€
Actualisation intermédiaire	21 046 M€	2 773 M€	15 057 M€	26 810 M€	16 710 M€ ; 25 374 M€



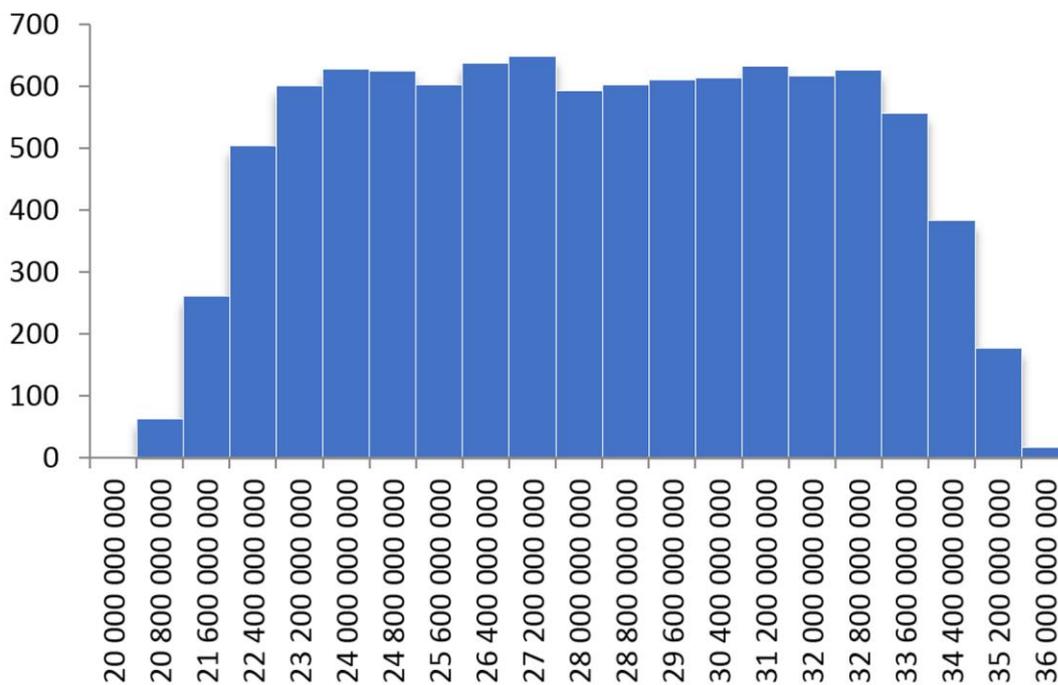
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0095-B

Figure Annexe 16.4-4 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0043-A

Figure Annexe 16.4-5 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0096-B

Figure Annexe 16.4-6 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO

Annexe 17 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 3

17.1 Hypothèses de l'option 3

Tableau Annexe 17.1-1 Solutions de gestion de l'option 3

Branches de l'option 3	Solution de gestion pour les MA-VL	Solution de gestion pour les HA
Branche 3.1.a	Technologie prospective (forage profond)	Technologie prospective (forage profond)
Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Branches 3.1.c et 3.2.a	Stockage géologique profond	Technologie prospective (forage profond)

Tableau Annexe 17.1-2 Hypothèses de l'option 3 - Branche 3.1.a

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹²
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2019-2089	10 571 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2030-2040			
Dont stockage MA-VL	N/A			
Dont stockage HA	N/A			
Transport	2030-2155	1 582 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour phase industrielle pilote	2030-2039	110 M€		
Dont pour stockage HA	2091-2155	231 M€		
Dont pour stockage MA-VL	2091-2150	1 241 M€		
GIP	2019-2025	420 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2088	6 294 M€	H : 1 puis 0,1	

⁹² Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - Scenarii et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹²
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€		I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€		
Technologie prospective	2086-2155	50 436 M€		
Dont coût annexe au forage profond	2086-2090	2 248 M€		
Dont mise en forage profond HA	2091-2155	10 087 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont mise en forage profond MA-VL	2091-2155	36 658 M€		
Dont densification MA-VL	2091-2155	1 443 M€		
Entreposage	2040-2150	3 243 M€		
Dont HA	2080-2155	48 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont MA-VL	2040-2150	3 195 M€		

Tableau Annexe 17.1-3Hypothèses de l'option 3 - Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹³
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2019-2156	26 737 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2030-2040			
Dont stockage MA-VL	2070-2130			
Dont stockage HA	2080-2145			
Transport	2030-2145	1 472 M€		
Dont pour phase industrielle pilote	2030-2039	110 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage HA	2080-2145	228 M€		
Dont pour stockage MA-VL	2070-2125	1 135 M€		
GIP	2019-2025	420 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0

⁹³ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - Scenarii et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹³
R&D	2019-2069	7 140 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2069	1 653 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage (MA-VL uniquement)	2040-2125	2 102 M		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1

Tableau Annexe 17.1-4Hypothèses de l'option 3 - Branches 3.1.c et 3.2.a

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁴	
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2019 - 2139	16 813 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1	
Dont phase industrielle pilote	2030-2040				
Dont stockage MA-VL	2070-2130				
Dont stockage HA	N/A				
Transport	2030-2155	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1	
Dont pour phase industrielle pilote	2030-2039	110 M€			
Dont pour stockage HA	2091-2155	228 M€			
Dont pour stockage MA-VL	2070-2125	1 135 M€			
GIP	2019-2025	420 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0

⁹⁴ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁴
Recherche de site	2019-2088	6 294 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€		
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€		
Technologie prospective	2086-2155	11 637 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont constructions annexes	2086-2090	1 697 M€		
Dont mise en forage HA	2091-2155	9 940 M€		
Entreposage	2040-2155	2 150 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont HA	2080-2155	48 M€		
Dont MA-VL	2040-2125	2 102 M€		

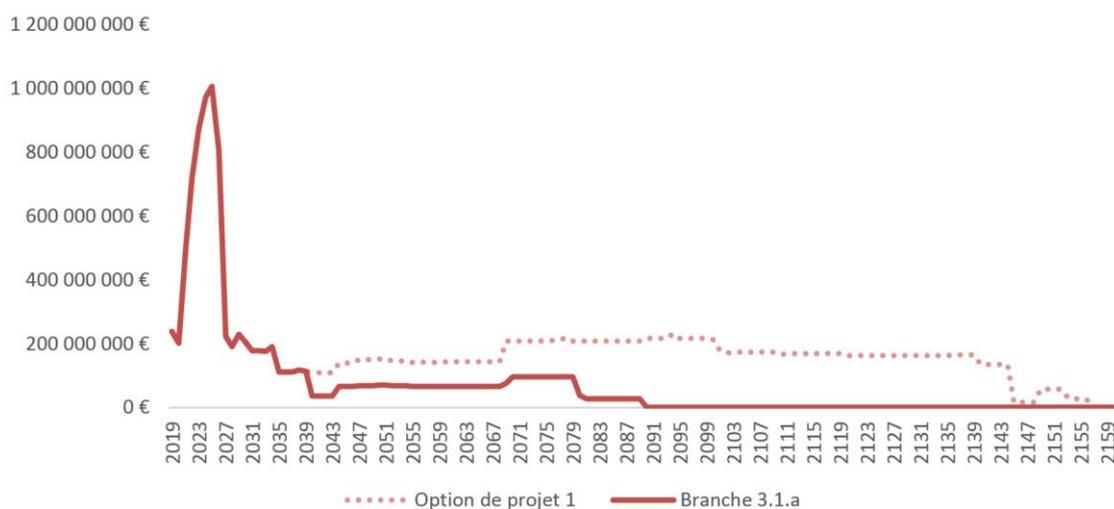
17.2 Coûts unitaires de l'option 3

17.2.1 Coût de mise en place de Cigéo

Dans cette option d'investissement, les coûts relatifs à la mise en place de Cigéo sont identiques à ceux de l'option de projet 1, jusqu'en 2040. Au-delà, dans l'option de projet 1, le stockage des déchets MA-VL démarre, alors que dans l'option 3, la décision est prise, le cas échéant, de décaler le stockage des déchets dans Cigéo à partir de 2070. Les coûts associés à la mise en place de Cigéo pour les différentes situations peuvent donc être découpés en trois périodes :

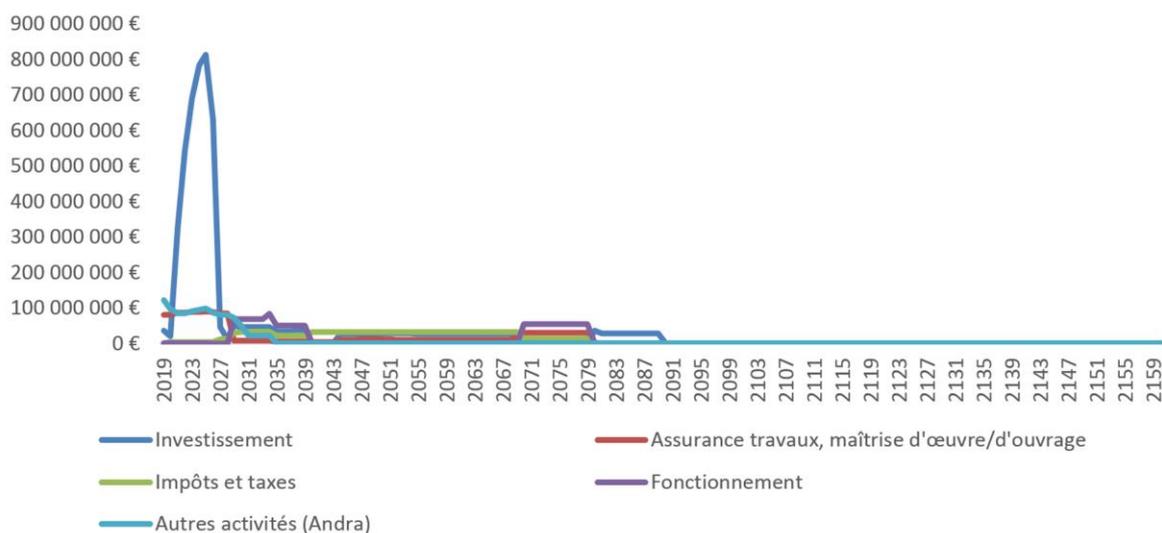
- **De 2019 jusqu'à la prise de décision du report, vers 2040** : sur cette période, il n'y a pas de modification des investissements et de la chronique de stockage des déchets par rapport à l'option de projet 1. De ce fait, la chronique de coûts de l'option 3 est identique à celle de l'option de projet 1. Ainsi, des coûts de fonctionnement liés aux essais sont appliqués de 2029 à 2040 pour tenir compte du stockage des premiers colis de la phase industrielle pilote. Aucun changement ne s'applique aux coûts des activités sous maîtrise d'ouvrage Andra, qui sont prévus uniquement jusqu'en 2034, conformément au calendrier illustratif de l'option de projet 1 ;
- **Durant la période de report du stockage des MA-VL, de 2040 jusqu'à la prise de décision vers 2070** : à partir de 2040, seuls les coûts de jouvence et de fiscalité sont maintenus, de façon à pouvoir « reprendre » le stockage profond dans Cigéo dès 2070 si la recherche d'une technologie prospective est infructueuse (pour l'ensemble des déchets HA et MA-VL dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3, ou seulement pour les déchets HA dans les branches 3.1.c et 3.2.a) ;
- **Au-delà de 2070** : les coûts post-2070 sont détaillés par branche ci-après, selon la situation rencontrée.

Branche 3.1.a – les déchets HA et MA-VL sont finalement gérés par une technologie prospective, après retrait des premiers déchets mis en stockage profond au sein de Cigéo durant la phase industrielle pilote



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0097-B

Figure Annexe 17.2-1 Comparaison des chroniques des coûts de mise place de Cigéo dans la branche 3.1.a et dans l’option de projet 1



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0098-B

Figure Annexe 17.2-2 Chroniques des coûts de mise place de Cigéo pour la branche 3.1.a (retrait des premiers déchets HA et MA-VL de Cigéo), par type de coût

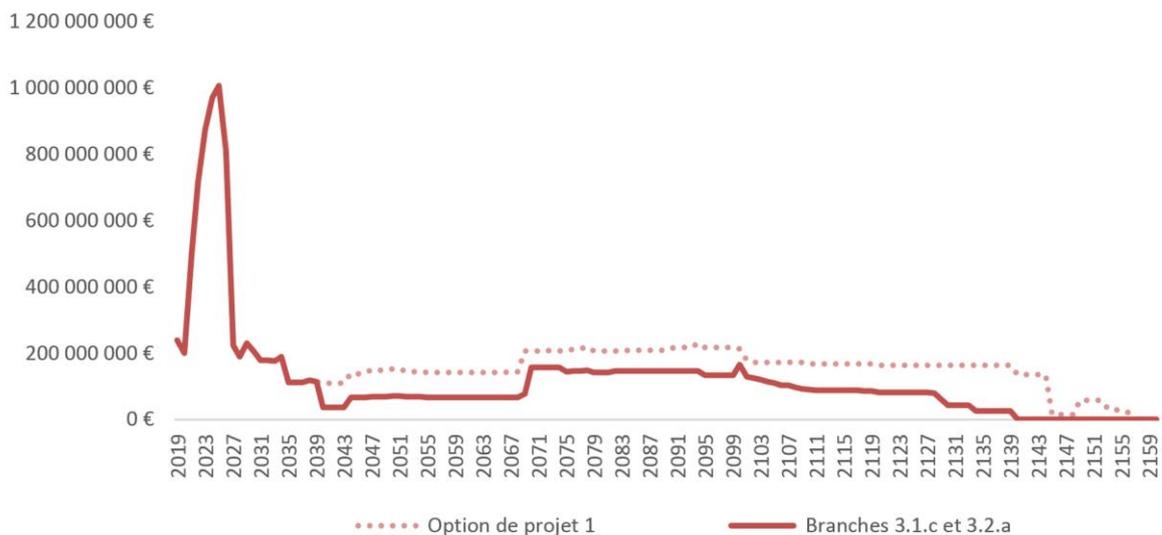
Concernant les **coûts d’investissements**, seuls sont conservés les coûts liés au démantèlement qui a lieu entre 2080 et 2089 dans cette branche (alors qu’il a lieu entre 2145 et 2155 dans l’option de projet 1).

Concernant les **coûts de fonctionnement**, des coûts apparaissent entre 2070 et 2080, et représentent les coûts nécessaires pour retirer les premiers déchets HA0 et MA-VL stockés pendant la phase

industrielle pilote. Ces coûts sont donc égaux à ceux observés sur la période 2030 à 2040, lors de la phase industrielle pilote pour la mise en stockage de ces premiers déchets HA0 et MA-VL.

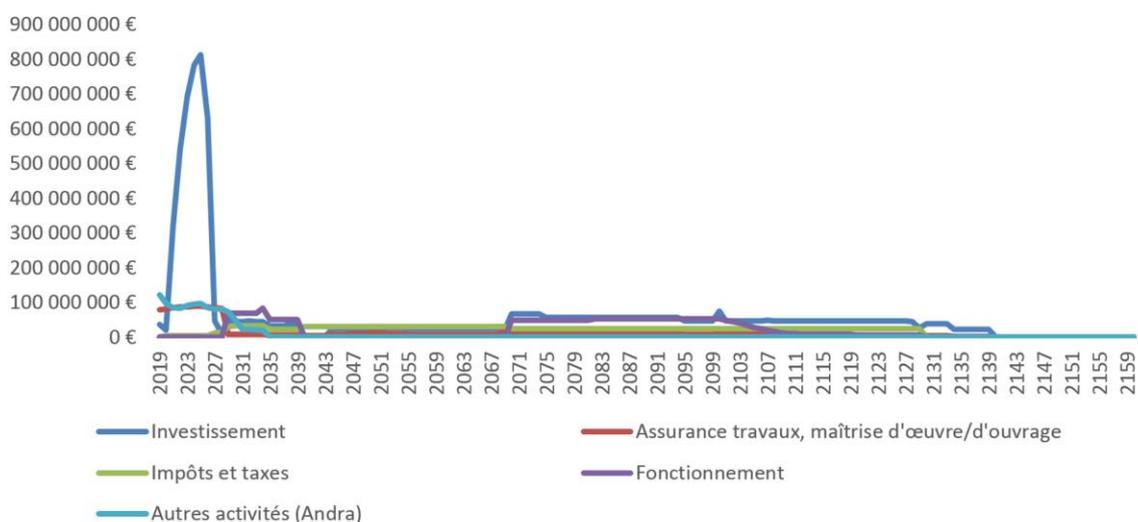
Concernant les **autres coûts** (assurances travaux, maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage, impôts et taxes) entre 2070 et 2080, ceux-ci sont supposés égaux à la moyenne annuelle de ces mêmes coûts lors du stockage de la phase industrielle pilote des premiers déchets HA0 et MA-VL sur la période 2030 à 2040, pour être ensuite ramenés à zéro après 2080.

Branches 3.1.c et 3.2.a – les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, alors que les déchets HA sont gérés par une technologie prospective



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0099-B

Figure Annexe 17.2-3 Comparaison des chroniques des coûts de mise place de Cigéo dans les branches 3.1.c et 3.2.a (déchets MA-VL uniquement dans Cigéo) et dans l'option de projet 1



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0100-B

Figure Annexe 17.2-4 Chronique des coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.c et 3.2.a (déchets MA-VL uniquement dans Cigéo), par type de coûts

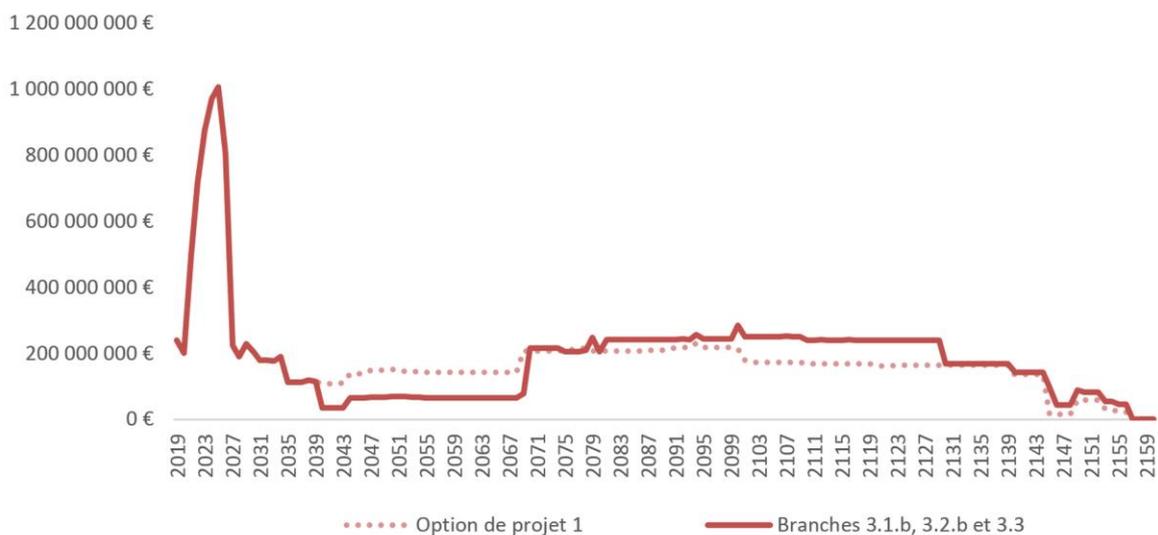
Après 2070, tous les coûts d'investissements relatifs aux déchets MA-VL suspendus depuis 2040, sont relancés. Le démantèlement des opérations liées aux déchets HA peut commencer, pour se terminer au maximum en 2080.

La mise en stockage profond des déchets MA-VL dans Cigéo peut commencer dès 2070, l'ensemble des constructions nécessaires ayant été réalisées. Afin d'isoler les dépenses nécessaires en phase de fonctionnement, nous procédons comme suit :

- pour les **coûts de fonctionnement**, nous supposons des coûts égaux à ceux de la branche 2.1.b de l'option 2 décalés de 30 ans ;
- pour les **coûts d'assurances travaux, de maîtrise d'œuvre et d'ouvrage**, de la même manière, nous supposons des coûts égaux à ceux de la branche 2.1.b de l'option 2 décalés de 30 ans ;
- pour les **coûts de fiscalité**, nous utilisons la moyenne annuelle de ces mêmes coûts considérés dans l'option de projet 1 entre 2040 et 2080, période où seuls les déchets MA-VL sont stockés dans Cigéo.

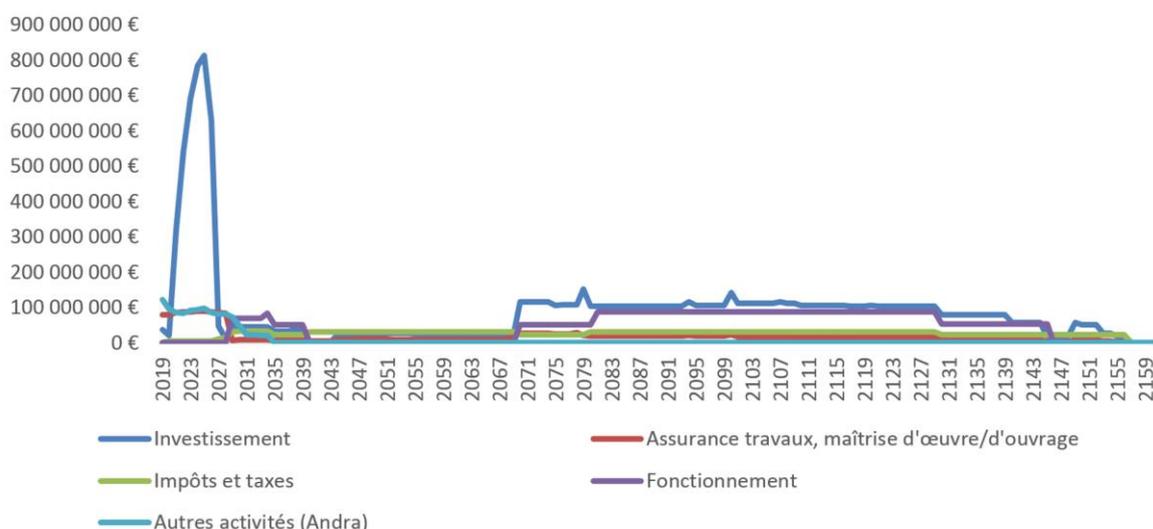
Le démantèlement est supposé avoir lieu sur 10 ans, entre 2130 et 2139.

Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 – les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0101-B

Figure Annexe 17.2-5 Comparaison des chroniques de coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 (déchets HA et MA-VL dans Cigéo), et dans l'option de projet 1



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0102-B

Figure Annexe 17.2-6 Chronique de coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 (déchets HA et MA-VL dans Cigéo) par type de coûts

Après 2070, tous les coûts d'investissements relatifs aux HA et MA-VL sont relancés.

La mise en stockage profond des déchets MA-VL, suspendue en 2040, peut reprendre dès 2070, l'ensemble des constructions initiales nécessaires ayant été réalisées. Afin d'isoler les dépenses nécessaires, nous procédons comme suit :

- pour les **coûts de fonctionnement**, nous procédons en trois étapes :
 - ✓ de 2070 à 2080, les coûts de fonctionnement sont supposés égaux à ceux de la période 2040 à 2050 en option de projet 1 : les déchets MA-VL sont en effet les seuls à être stockés ;
 - ✓ de 2130 à 2145, où seuls les déchets HA sont stockés dans cette branche, les coûts de fonctionnement sont supposés égaux à ceux de la même période en option de projet 1 ;
 - ✓ entre 2080 et 2130, les déchets HA et MA-VL sont mis en stockage profond au sein de Cigéo. Nous soustrayons au coût de fonctionnement total de Cigéo les deux coûts de fonctionnement estimés ci-dessus, et étalons le restant des coûts de fonctionnement entre ces deux dates. Ainsi, nous obtenons un coût de fonctionnement identique à celui de Cigéo en option de projet 1.
- pour les **dépenses de fiscalité**, nous avons également procédé en trois étapes :
 - ✓ de 2070 à 2080, nous avons mobilisé la moyenne annuelle des coûts de fiscalité lorsque seuls les déchets MA-VL sont mis en stockage profond au sein de Cigéo en option de projet 1 ;
 - ✓ de 2130 à 2145, la moyenne annuelle des coûts de fiscalité lorsque seuls les déchets HA sont mis en stockage profond en option de projet 1 ;
 - ✓ entre 2080 et 2130, la moyenne annuelle des coûts de fiscalité lorsque les déchets HA et MA-VL sont mis en stockage profond au sein de Cigéo en option de projet 1.
- pour les **coûts d'assurances travaux, de maîtrise d'œuvre et d'ouvrage**, une logique de ratios identique à celle décrite ci-dessus est appliquée ;

Le démantèlement est supposé avoir lieu sur 10 ans, entre 2145 et 2156, comme dans l'option de projet 1.

La Figure Annexe 17.2-7 représente la chronique de l'ensemble des coûts relatifs à Cigéo, dans les 3 branches distinctes de l'option 3. Les courbes divergent après 2070.

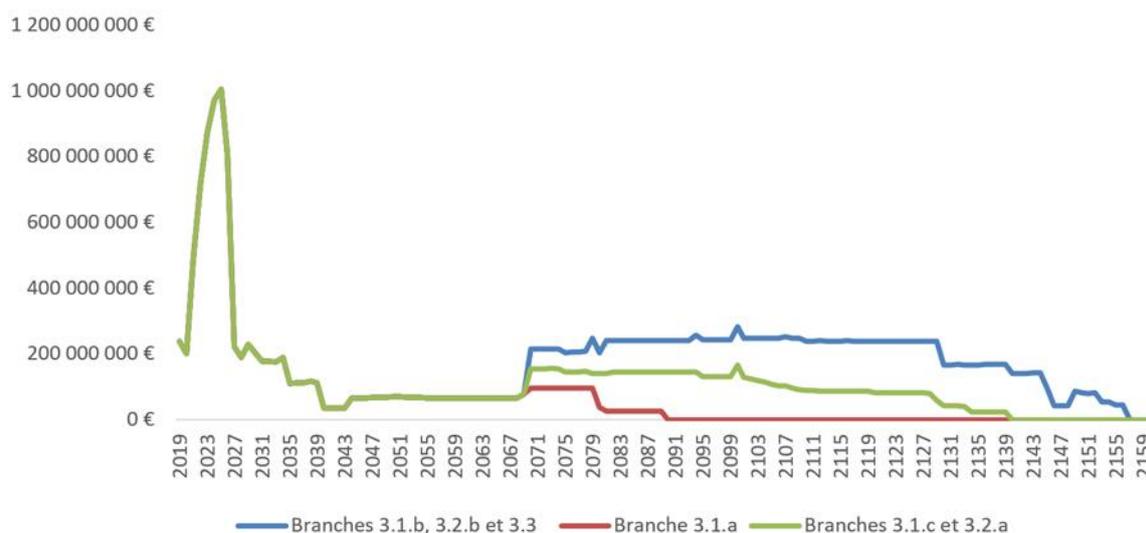


Figure Annexe 17.2-7 Chronique des coûts de mise en place de Cigéo dans les branches de l'option 3

Le tableau ci-dessous résume les coûts relatifs à la mise en place de Cigéo dans les branches distinctes de l'option 3.

Tableau Annexe 17.2-1 Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 3, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 3				
Choix de gestion pour les MA-VL	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les HA			Technologie prospective	
Typologie de coût	Branche 3.1.a	Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Branches 3.1.c et 3.2.a	
Investissement et fonctionnement	6 510 M€	19 337 M€	11 096 M€	5 693 M€
Assurance travaux, maîtrise d'œuvre/ d'ouvrage, impôts et taxes	2 935 M€	6 275 M€	4 591 M€	2 503 M€
Autres activités (Andra)	1 125 M€	1 125 M€	1 125 M€	1 125 M€
Coût brut total	10 571 M€	26 737 M€	16 813 M€	9 322 M€

17.2.2 Coût de transport

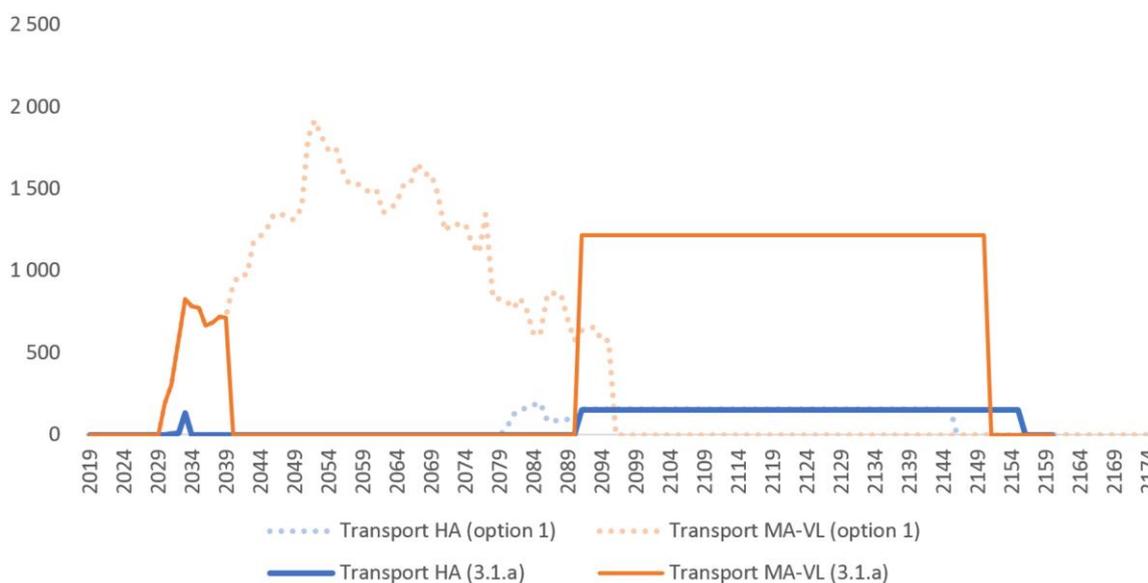
Dans l'option 3, le transport des déchets radioactifs est identique dans l'ensemble des branches jusqu'en 2070 :

- jusqu'en 2040, le transport des premiers déchets radioactifs HA0 et MA-VL s'effectue vers le centre de stockage Cigéo pour la phase industrielle pilote ;
- sur la période entre 2040 et 2070 : aucun transport n'intervient, car en effet, on décale le stockage des déchets MA-VL par rapport à l'option de projet 1, pour se laisser le temps de la recherche de 2040 à 2070 ;
- à partir de 2070, le transport reprend, soit vers le centre de stockage Cigéo, soit vers le site de la technologie prospective, selon le mode de gestion retenu dans la branche considérée.

Branche 3.1.a – les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective, après retrait des premiers déchets mis en stockage profond au sein de Cigéo durant la phase industrielle pilote

La branche 3.1.a correspond à la situation où une technologie prospective est trouvée et mise en place pour les déchets HA et MA-VL. L'ensemble des déchets est transporté entre 2091 et 2155 vers le site de la technologie prospective. On note que les déchets de la phase industrielle pilote sont transportés deux fois : une fois vers le centre de stockage Cigéo, et une fois vers le site de la technologie prospective. Cette branche présente donc des coûts de transport bruts qui divergent de l'option de projet 1.

On note que la chronique de transport des déchets MA-VL est lissée dans le cas du forage profond. En effet, ne sachant pas quelle sera le rythme de stockage en forage profond, nous posons l'hypothèse d'un rythme constant sur la période.

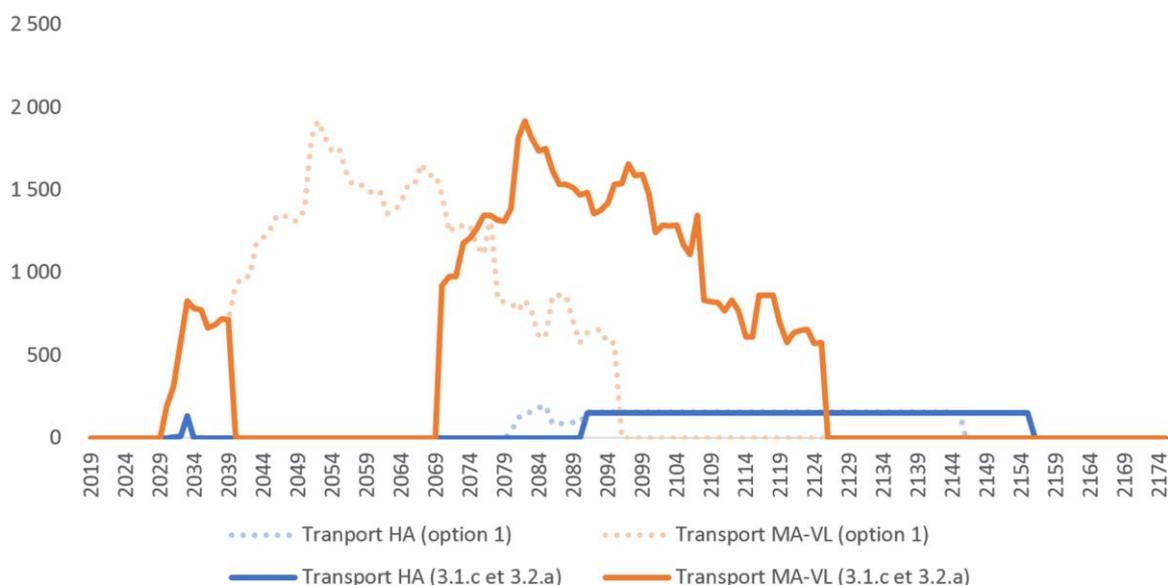


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0105-B

Figure Annexe 17.2-8 Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans la branche 3.1.a, en m³

Branches 3.1.c et 3.2.a – les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, alors que les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Les branches 3.1.c et 3.2.a correspondent à la situation où la technologie prospective est mise en place uniquement pour les déchets HA. La chronique de transport des déchets HA est dès lors identique à celle de la branche 2.1.b de l'option 2. Concernant les déchets MA-VL, la chronique est celle de l'option de projet 1 décalée de 30 ans : le stockage des déchets MA-VL commence en effet seulement en 2070 (alors qu'il débute en 2040 dans l'option de projet 1). Le transport de déchets en phase industrielle pilote (2030-2039) reste lui identique.

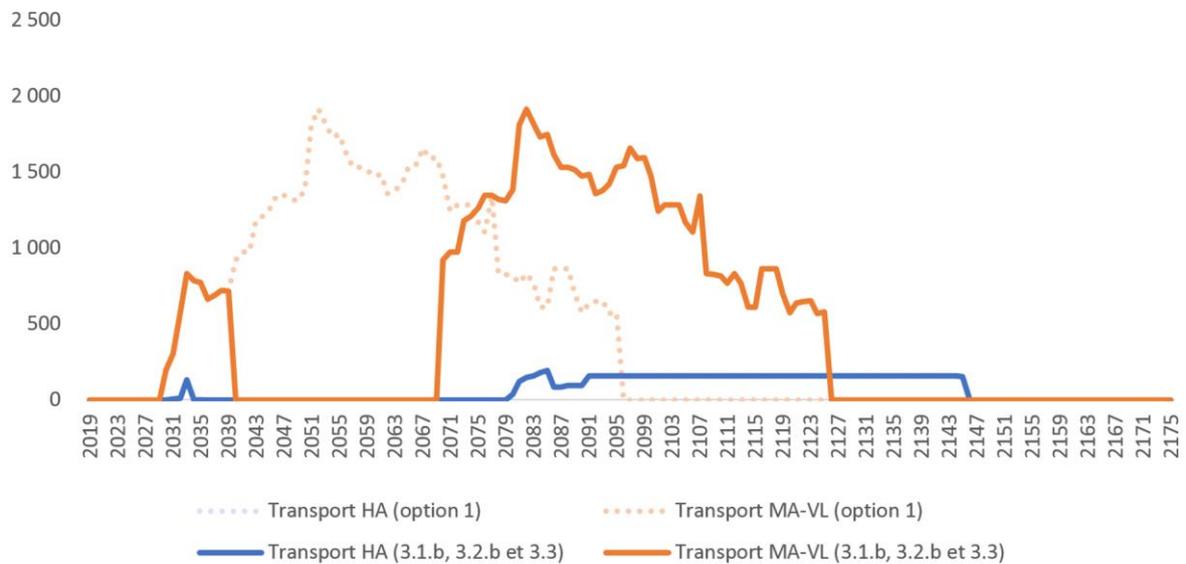


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0106-B

Figure Annexe 17.2-9 Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans les branches 3.1.c et 3.2.a, en m³

Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 – les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

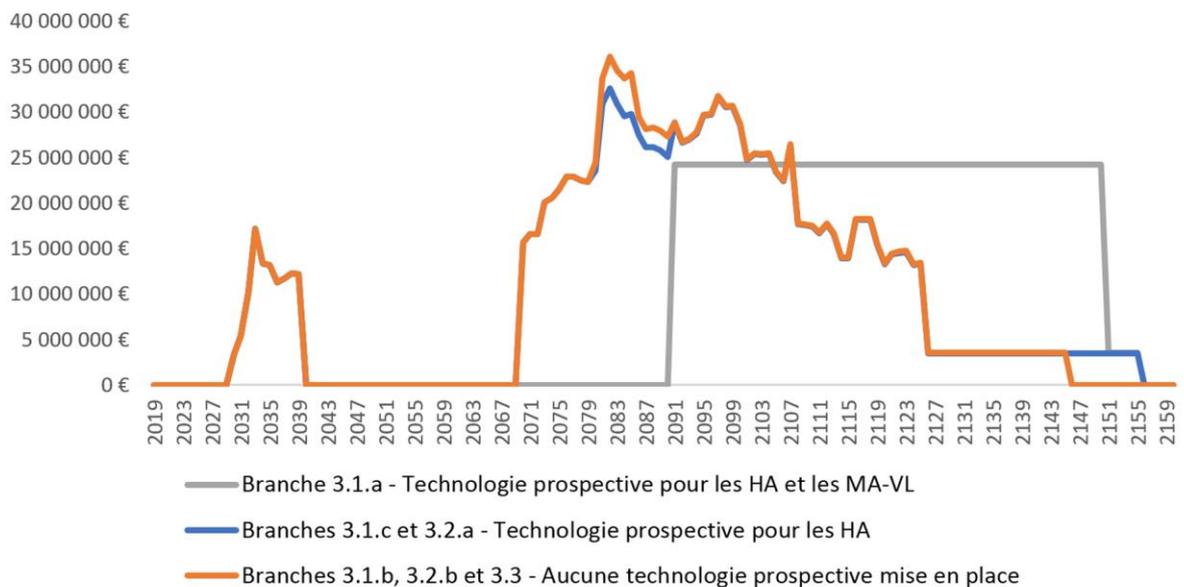
Les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 correspondent à la situation où aucune technologie prospective ni site associé ne sont trouvés ou mis en place en raison d'un coût trop élevé. Le transport des déchets HA, qui sont stockés aux mêmes dates que dans l'option de projet 1, est donc inchangé. Les déchets MA-VL en phase industrielle sont eux, comme dans les branches 3.1.c et 3.2.a, transportés selon la chronique de l'option de projet 1 décalée de 30 ans.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0107-B

Figure Annexe 17.2-10 Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3, en m³

Le graphique suivant représente les coûts de transports des branches de l'option 3. On observe que la chronique diverge après 2070.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0110-B

Figure Annexe 17.2-11 Chronique des coûts de transport des déchets HA et MA-VL pour les branches de l'option 3

Enfin, le tableau suivant résume le montant des coûts bruts de transport des branches de l'option 3. En ayant posé l'hypothèse d'un coût en €/m³ identique quelle que soit la technologie retenue, on observe que les coûts bruts sont identiques dans les branches utilisant le stockage profond pour les déchets MA-VL seuls ou couplés aux déchets HA, mais sont supérieurs dans la branche 3.1.a. Cette branche 3.1.a présente la particularité que les premiers déchets stockés lors de la phase industrielle pilote doivent être

transportés deux fois : vers le site de stockage profond, puis vers le site de la technologie prospective après retrait.

Tableau Annexe 17.2-2 Coût brut de transport dans l'option 3, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de transport dans l'option 3				
Choix de gestion pour les MA-VL	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond	Dont branche commune (<2070)
Choix de gestion pour les HA			Technologie prospective	
Typologie de coût	Branche 3.1.a	Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Branches 3.1.c et 3.2.a	
Déchets MA-VL et HA0	1 348 M€	1 241 M€	1 241 M€	110 M€
Déchets HA	234 M€	231 M€	231 M€	-
Coût brut total	1 582 M€	1 472 M€	1 472 M€	110 M€

17.2.3 Coût d'entreposage

Branche 3.1.a- les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective, après retrait des premiers déchets mis en stockage profond au sein de Cigéo durant la phase industrielle pilote

Le coût d'entreposage est le suivant :

- pour les déchets HA : dans l'option de projet 1, les déchets HA sont stockés dans le centre de stockage Cigéo en 2080 ; dans cette branche 3.1.a, les déchets sont évacués vers la technologie prospective à partir de 2090, soit un décalage de 10 ans de la durée d'entreposage, entraînant des coûts supplémentaires de fonctionnement des installations temporaires d'entreposage. La chronique des coûts d'entreposage est identique à celle de la branche 2.1.b de l'option 2. Ainsi, les surcoûts d'entreposage sont identiques à la branche 2.1.b de l'option 2 ;
- pour les déchets MA-VL : dans cette branche 3.1.a, les déchets MA-VL sont évacués vers le site de la technologie prospective à partir de 2090, et non à partir de 2040 comme dans l'option de projet 1. Ainsi, l'entreposage est prolongé de 50 ans.

Branche 3.1.c et 3.2.a – les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, alors que les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Le coût d'entreposage est le suivant :

- pour les déchets HA : situation identique à celle de la branche 3.1.a ; le surcoût d'entreposage est donc identique à celui de la branche 2.1.b de l'option 2 ;
- pour les déchets MA-VL : aucune technologie prospective n'est trouvée pour les déchets MA-VL. Leur mise en stockage dans Cigéo est toutefois décalée par rapport à l'option de projet 1, et ne commence ici qu'à partir de 2070, à la fin de la période de R&D. Ainsi, les déchets MA-VL sont entreposés dans cette branche 30 ans de plus que dans l'option de projet 1.

Branche 3.1.b, 3.2.b, 3.3 – les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Le coût d'entreposage est le suivant :

- pour les déchets HA : les déchets HA sont stockés dans cette branche à partir de 2080, tout comme dans l'option de projet 1. Ainsi, nous ne retenons aucun surcoût ;
- pour les déchets MA-VL : situation identique à celle des branches 3.1.c et 3.2.a.

Tableau Annexe 17.2-3 Coût brut d'entreposage de l'option 3, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage de l'option 3			
Choix de gestion pour les MA-VL	Technologie prospective	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA			Technologie prospective
Typologie de coût	Branche 3.1.a	Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	Branches 3.1.c et 3.2.a
Déchets MA-VL	3 195 M€	2 102 M€	2 102 M€
Déchets HA	48 M€	(négligeable)	48 M€
Coût brut total	3 243 M€	2 102 M€	2 150 M€

17.2.4 Coût de R&D

Les coûts de R&D sont identiques dans toutes les branches de l'option 3. Un total de 140 millions d'euros est dépensé chaque année de 2019 jusqu'en 2070.

17.2.5 Coût de recherche de site

Dans les branches 3.1.a, ainsi que 3.1.c et 3.2.a, dans lesquelles les déchets radioactifs sont gérés par une technologie prospective, les coûts de recherche de site sont identiques à ceux de l'option 2.1.b⁹⁵ et détaillés dans le chapitre 5.1 du présent document.

L'hypothèse a en effet été posée que les coûts de recherche de site pour une technologie prospective sont identiques que l'on cherche un site pour tous les déchets, ou pour les déchets MA-VL seuls ou pour les déchets HA seuls.

17.2.6 Coût de technologie prospective

Les coûts de mise en place de la technologie prospective divergent selon la branche considérée.

Branche 3.1.a- les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective, après retrait des premiers déchets mis en stockage profond au sein de Cigéo durant la phase industrielle pilote

⁹⁵ Pour la branche 3.1.a, il est vraisemblable que ce coût, qui est identique aux branches 3.1.c et 3.2.a et à la branche 2.1.b de l'option 2, soit sous-estimé alors que les surfaces à rechercher sont supérieures afin de pouvoir mettre en place la technologie prospective pour les HA et pour les MA-VL. A défaut d'hypothèses crédibles pour accroître ce coût, nous le laissons tel quel.

Une technologie prospective est trouvée et mise en place pour les déchets HA et les déchets MA-VL.

- Pour les déchets HA, ce coût est identique à celui dérivé dans la branche 2.1.b de l'option 2, augmenté de coûts de mise en forage des déchets HA0 (qui restent stockés au sein de Cigéo pour l'option 2).
- Pour les déchets MA-VL, la première étape concerne le processus de densification des déchets. La mise en forage profond des déchets MA-VL nécessite une reprise de leur conditionnement. Cette reprise pourrait s'accompagner d'un traitement visant à réduire le volume de ces déchets pour optimiser l'espace de stockage. En s'appuyant sur les travaux du CEA réalisés dans le cadre du PNGMDR 2013-2015, hypothèse est faite d'une réduction d'un facteur 2 du volume de l'ensemble des déchets. Comme expliqué dans le chapitre 5.1 sur les coûts unitaires, ce coût du processus de densification avoisinera le milliard d'euros.
- La seconde étape consiste à la mise en forage profond. Nous nous appuyons pour ce faire sur la thèse de Bates. Le coût de stockage après réduction du volume des déchets MA-VL est considéré comme égal à celui des déchets HA.

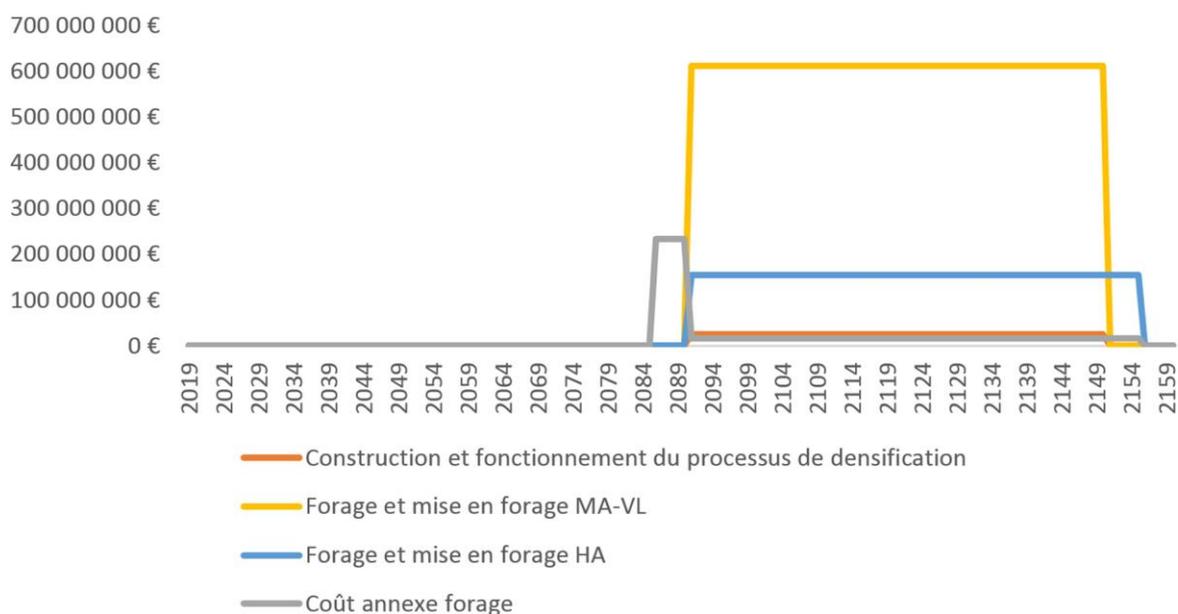
A partir de ces hypothèses, le coût de stockage des déchets MA-VL en forage profond est déduit du coût de stockage des déchets HA en forage profond comme suit :

$$C_{MA-VL} = C_{HA} \times \frac{V_{MA-VL}}{2 \times V_{HA}}$$

Le coût complet de la technologie prospective (processus de densification et de mise en forage profond) pour l'ensemble des déchets est rapporté dans le tableau ci-dessous :

Tableau Annexe 17.2-4 Coût brut de densification et mise en forage profond des déchets MA-VL dans la branche 3.1.a

Coût brut de densification et mise en forage profond des déchets MA-VL dans la branche 3.1.a	
Choix de gestion pour les MA-VL	Technologie prospective
Choix de gestion pour les HA	
Typologie de coût	Branche 3.1.a
Coût de construction/démantèlement processus de densification	374 M€
Coût de fonctionnement du processus de densification	1 069 M€
Coût de mise en forage profond HA	10 087 M€
Coût de mise en forage profond MA-VL	36 658 M€
Coût annexe au forage profond	2 248 M€
Coût brut total	50 436 M€

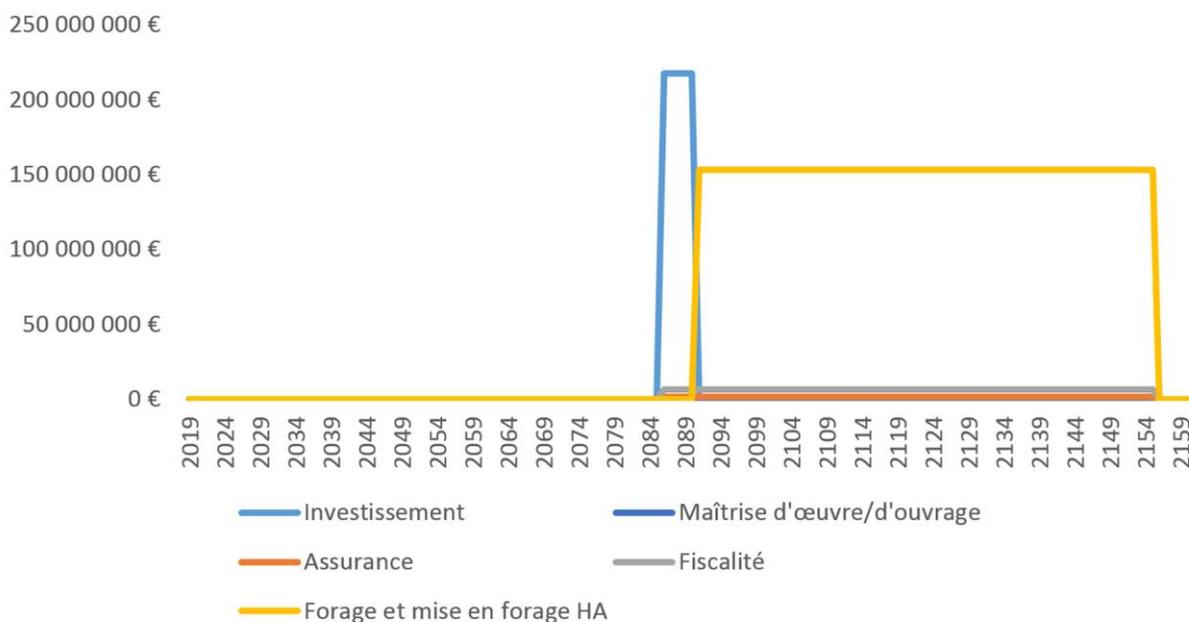


CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0111-B

Figure Annexe 17.2-12 Coût de la technologie prospective dans la branche 3.1.a de l'option 3 (HA et MA-VL dans la technologie prospective)

Branches 3.1.c et 3.2.a - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, alors que les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Nous utilisons les mêmes coûts que ceux utilisés pour la branche 2.1.b de l'option 2. La Figure Annexe 17.2-13 représente la chronique des coûts de mise en place de la technologie prospective pour cette branche, puis le Tableau Annexe 17.2-5 présente le coût brut.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0112-B

Figure Annexe 17.2-13 Chronique des coûts bruts de mise en place de la technologie prospective pour les branches 3.1.c et 3.2.a (HA uniquement dans la technologie prospective), par type de coûts, en €₂₀₁₉

Tableau Annexe 17.2-5 Coût brut de la technologie prospective pour les déchets HA dans les branches 3.1.c et 3.2.a, en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut de la technologie prospective pour les déchets HA dans les branches 3.1.c et 3.2.a	
Choix de gestion pour les MA-VL	Stockage géologique profond
Choix de gestion pour les HA	Technologie prospective
Typologie de coût	Branches 3.1.c et 3.2.a
Forage et mise en forage	9 939 M€
Investissements (installations conventionnelles de surface ; liaisons surface-fond et ouvrages souterrains ; utilités externes et aménagements hors site)	1 086 M€
Maîtrise d'œuvre / d'ouvrage	60 M€
Fiscalité	452 M€
Assurance	100 M€
Coût brut total	11 637 M€

Branche 3.1.b, 3.2.b, 3.3 – les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

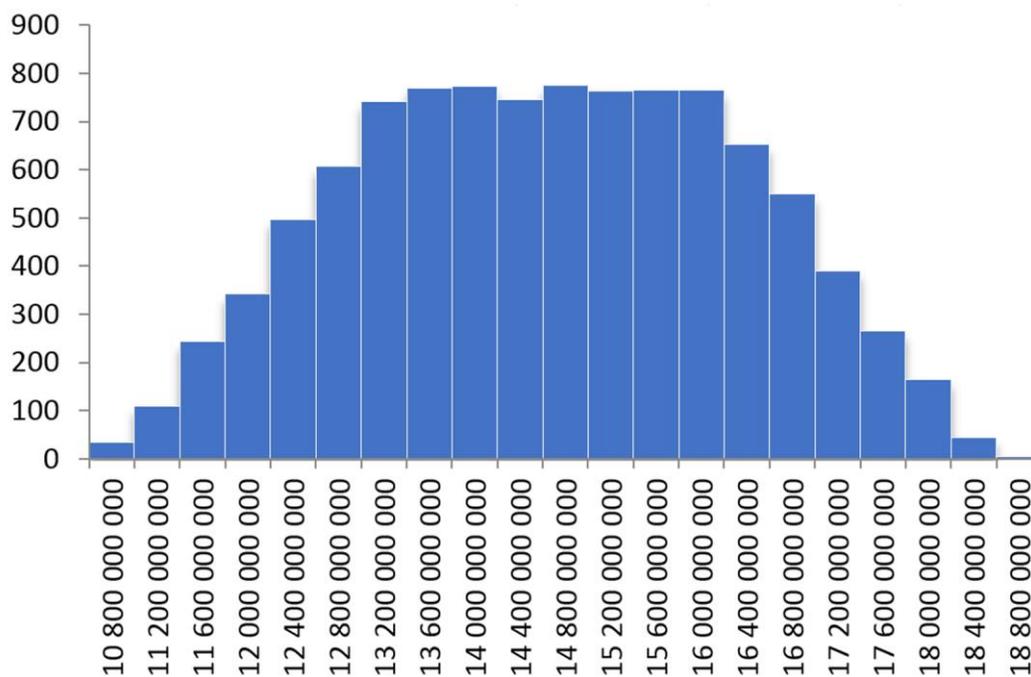
Dans ces branches, aucune technologie prospective n'est mise en place.

17.3 Coût actualisé de l'option 3

17.3.1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

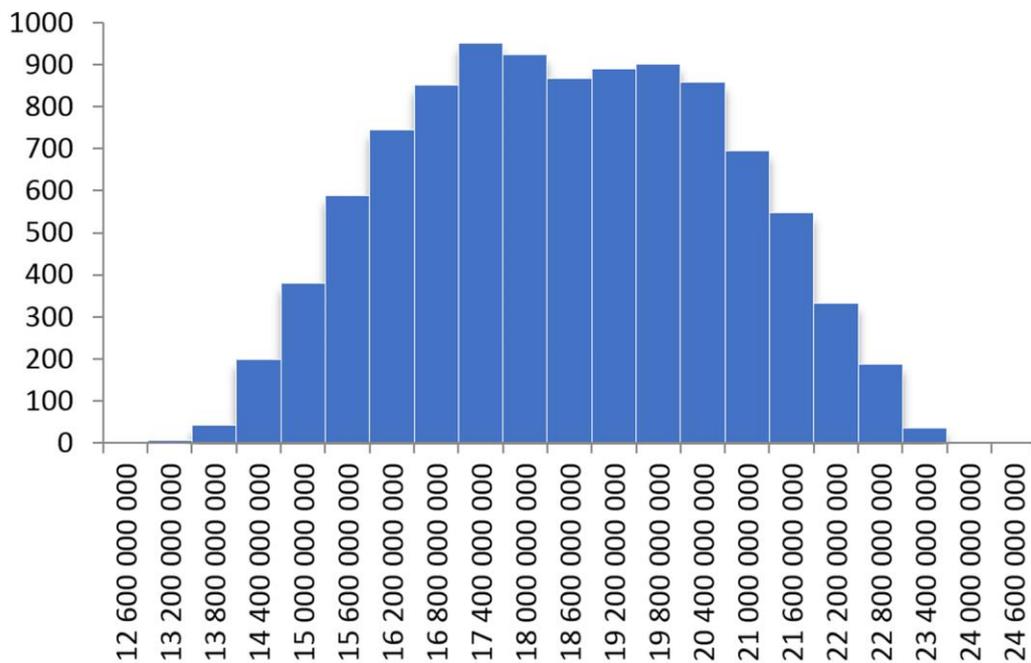
Tableau Annexe 17.3-1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

Option 3 Scénario OK	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	14 315 M€	1 642 M€	10 426 M€	18 270 M€	11 649 M€ ; 17 000 M€
Actualisation intermédiaire	18 042 M€	2 090 M€	13 126 M€	23 140 M€	14 648 M€ ; 21 340 M€
Actualisation basse	20 714 M€	2 419 M€	15 085 M€	26 389 M€	16 830 M€ ; 24 609 M€



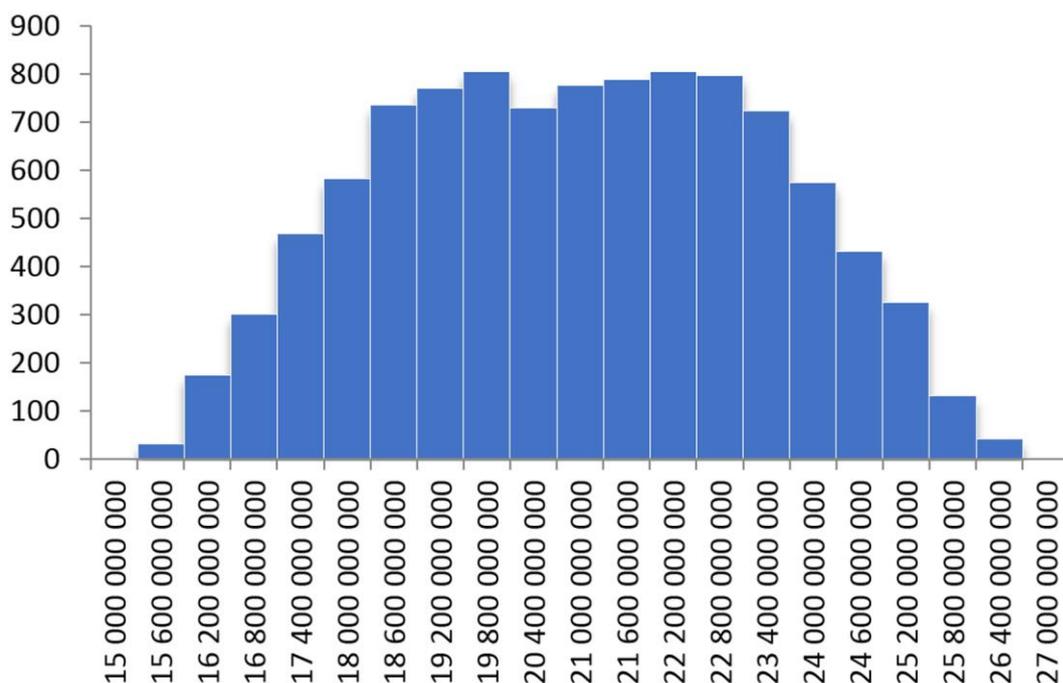
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0116-B

Figure Annexe 17.3-1 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0046-A

Figure Annexe 17.3-2 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK



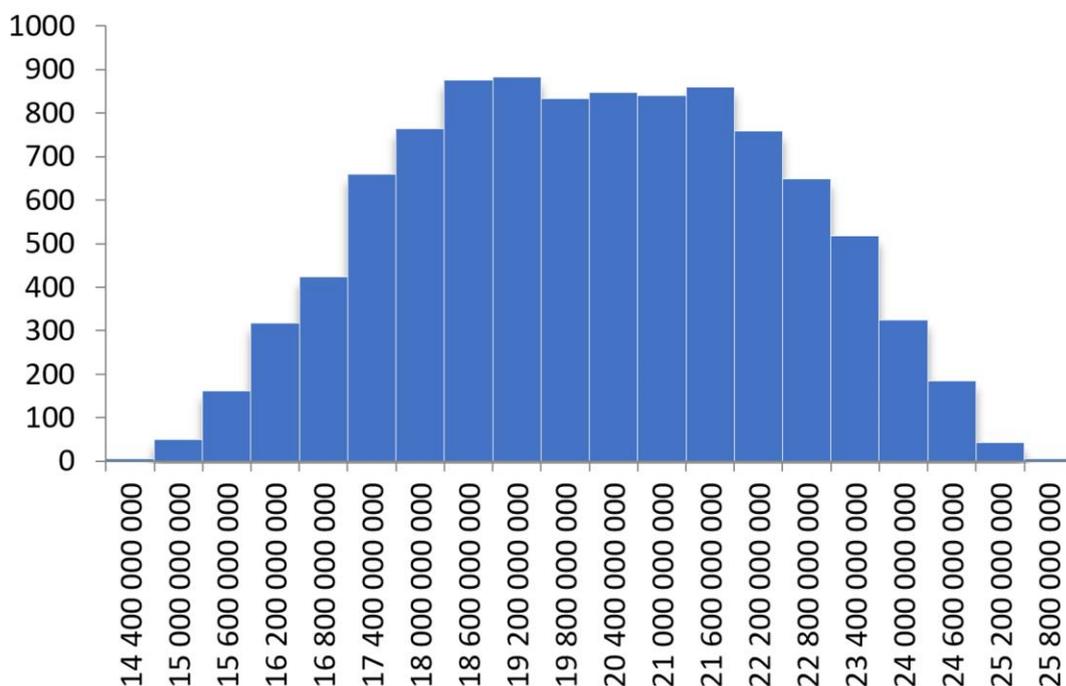
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0117-B

Figure Annexe 17.3-3 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK

17.3.2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO

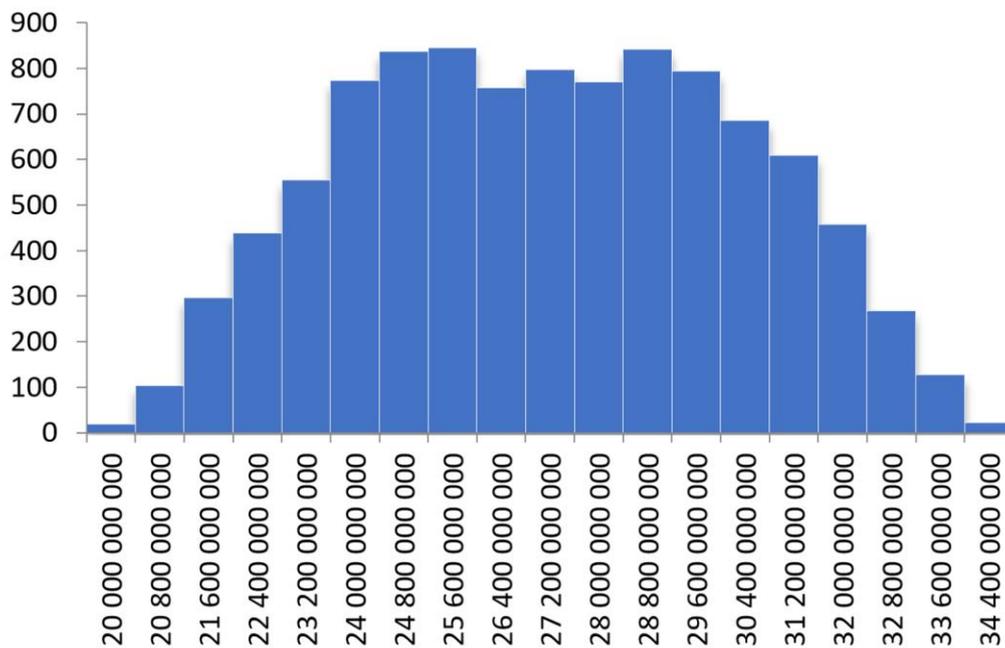
Tableau Annexe 17.3-2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO

Option 3 Scénario KO	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	17 194 M€	1 988 M€	12 419 M€	21 908 M€	13 958 M€ ; 20 418 M€
Actualisation intermédiaire	24 271 M€	2 849 M€	17 609 M€	30 924 M€	19 687 M€ ; 28 849 M€
Actualisation basse	32 678 M€	3 955 M€	23 835 M€	42 082 M€	26 446 M€ ; 38 950 M€



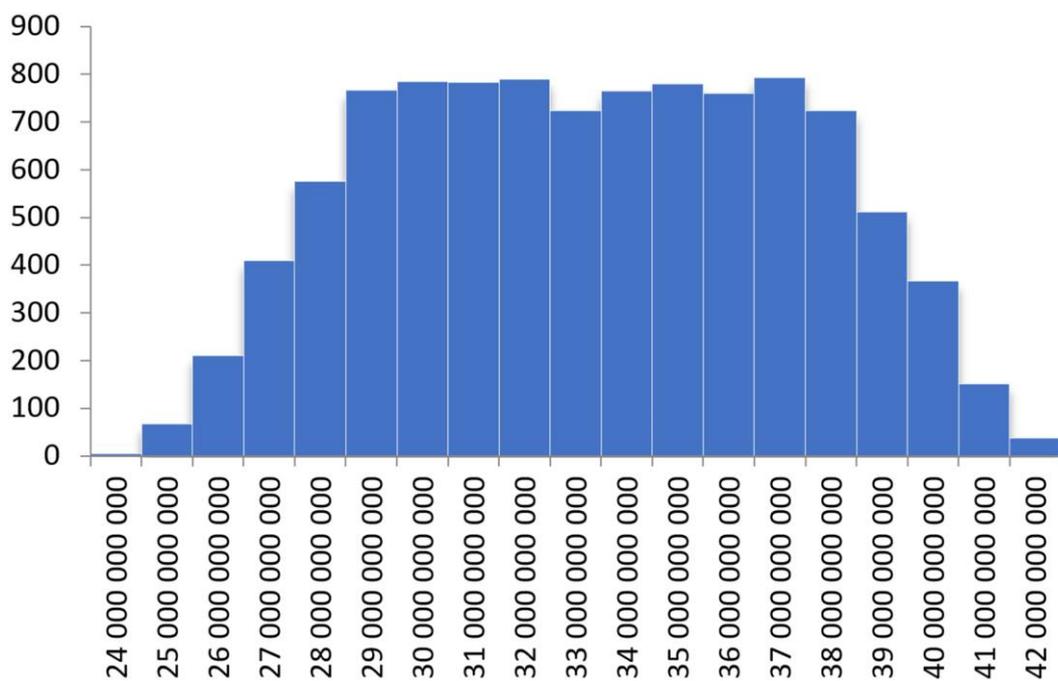
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0118-B

Figure Annexe 17.3-4 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0045-A

Figure Annexe 17.3-5 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0119-B

Figure Annexe 17.3-6 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO

Annexe 18 Détail des coûts et représentation graphique de l'option 4

18.1 Hypothèses de l'option 4

Tableau Annexe 18.1-1 Solutions de gestion de l'option 4

Branches de l'option 4	Solution de gestion pour les MA-VL	Solution de gestion pour les HA
Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6	Stockage géologique profond	Stockage géologique profond
Branche 4.1.b	Technologie prospective	Stockage géologique profond
Branches 4.1.c et 4.3.b	Stockage géologique profond	Technologie prospective
Branches 4.1.d et 4.2	Technologie prospective	Technologie prospective
Branche 4.4	Stockage géologique profond sur nouveau site	Technologie prospective
Branche 4.5	Entreposage de longue durée renouvelé	Technologie prospective
Branche 4.7	Stockage géologique profond sur nouveau site	Stockage géologique profond sur nouveau site
Branche 4.8	Entreposage de longue durée renouvelé	Entreposage de longue durée renouvelé

Tableau Annexe 18.1-2 Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁶
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2070-2165	25 518 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2081-2090			
Dont stockage MA-VL	2091-2151			
Dont stockage HA	2091-2155			
Transport	2081-2146	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage MA-VL (dont phase industrielle pilote)	2081-2146	231 M€		
Dont pour stockage HA (dont phase industrielle pilote)	2082-2155	1 241 M€		

⁹⁶ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁶
GIP	2019-2069	1 740 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2069	1 653 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2069	1 224 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2155	3 203 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont HA	2080-2155	48 M€		
Dont MA-VL	2030-2145	3 155 M€		

Tableau Annexe 18.1-3Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.1.b

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁷
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2070-2165	16 183 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2082-2090			
Dont stockage HA	2091-2155			
Transport	2081-2155	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage MA-VL	2091-2150	1 241 M€		
Dont pour stockage HA	2082-2155	231 M€		
Technologie prospective	2086-2150	39 798 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont constructions annexes	2086-2090	1 697 M€		
Dont densification MA-VL	2091-2150	1 443 M€		

⁹⁷ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - Scenarii et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁷
Dont mise en forage MA-VL	2091-2150	36 658 M€		
GIP	2019- 2069	1 740 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019- 2069	7 140 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019- 2088	6 293 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€		
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€		
Maintien du site	2019- 2069	1 652 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019- 2069	1 224 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2155	3 804 M€		
Dont HA	2080 - 2155	48 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont MA-VL	2030 - 2149	3 756 M€		

Tableau Annexe 18.1-4Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.c et 4.3.b

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁸
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2070-2160	14 909 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2081-2090			
Dont stockage MA-VL	2091-2150			
Transport	2081-2155	1 472 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage MA-VL	2081-2146	1 241 M€		
Dont pour stockage HA	2091-2155	231 M€		
Technologie prospective	2086-2155	11 784 M€		H : 1,5 puis 0,3

⁹⁸ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁸
Dont constructions annexes	2086-2090	1 697 M€		I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont mise en forage HA	2091-2155	10 087 M€		
GIP	2019-2069	1 740 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2088	6 293 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€		
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€		
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2069	1 224 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2155	3 203 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont HA	2080-2155	48 M€		
Dont MA-VL	2030-2145	3 155 M€		

Tableau Annexe 18.1-5Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.d et 4.2

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁹
Transport	2091-2155	1 472 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage MA-VL	2091-2150	231 M€		
Dont pour stockage HA	2091-2155	1 241 M€		
Technologie prospective	2086-2155	50 436 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont constructions annexes	2086-2090	2 248 M€		
Dont mise en forage HA	2091-2155	10 087 M€		

⁹⁹ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ⁹⁹	
Dont processus de densification MA-VL	2091-2150	1 443 M€			
Dont mise en forage MA-VL	2091-2150	36 658 M€			
GIP	2019-2069	1 740 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2088	6 294 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069	1 653 M€			
Dont phase 2	2070-2088	4 641 M€			
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2069	1 224 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2155	3 804 M€			H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont HA	2080-2155	48 M€			
Dont MA-VL	2030-2149	3 756 M€			

Tableau Annexe 18.1-6Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.4

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ¹⁰⁰
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2112-2203	14 909 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2123-2132			
Dont stockage MA-VL	2133-2193			
Transport	2023-2188	1 472 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont pour stockage MA-VL	2123-2188	1 241 M€		
Dont pour stockage HA	2091-2155	231 M€		

¹⁰⁰ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ¹⁰⁰
Technologie prospective	2086-2155	11 784 M€		H : 1,5 puis 0,3
Dont constructions annexes	2086-2090	1 697 M€		I : 0,8 puis 0,2
Dont mise en forage HA	2091-2155	10 087 M€		B : 0,1
GIP	2019-2069	1 740 M€		H : 1 puis 0,1
R&D	2019-2069	7 140 M€		I : 0,5 puis 0,05
Recherche de site	2019-2088	10 283 M€		B : 0
Dont phase 1	2019-2069, puis 2070-2099	3 002 M€		H : 1 puis 0,1
Dont phase 2	2070 à 2088, puis 2100 à 2118	7 280 M€		I : 0,5 puis 0,05
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€		B : 0
Maintien des compétences	2019-2099	1 944 M€		H : 1 puis 0,1
Entreposage	2030-2155	5 453 M€		I : 0,5 puis 0,05
Dont HA	2080-2155	48 M€		B : 0
Dont MA-VL	2030-2187	5 406 M€		H : 1,5 puis 0,3
				I : 0,8 puis 0,2
			B : 0,1	

Tableau Annexe 18.1-7Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.5

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ¹⁰¹	
Transport (HA uniquement)	2091-2155	231 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1	
Technologie prospective	2086-2155	11 784 M€		80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont constructions annexes	2086-2090	1 697 M€			
Dont mise en forage HA	2091-2155	10 087 M€			
GIP	2019-2069	1 740 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
R&D	2019-2069	7 140 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2088	7 644 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069, puis 2070-2099	3 002 M€			
Dont phase 2	2100 à 2118	4 641 M€			
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2600	13 968 M€			H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2155	29 780 M€			H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont HA	2080-2155	48 M€			
Dont MA-VL	2030-2187	29 732 M€			

¹⁰¹ Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - Scenarii et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Tableau Annexe 18.1-8Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.7

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité ¹⁰²
Conception, construction, fonctionnement et fermeture de Cigéo	2112-2208	25 518 M€	80-150 %	H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont phase industrielle pilote	2123-2132			
Dont stockage MA-VL	2133-2193			
Dont stockage HA	2133-2198			H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Transport	2123-2198	1 472 M€		
Dont pour stockage MA-VL	2123-2188	1 241 M€		
Dont pour stockage HA	2124-2198	231 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
GIP	2019-2069	1 740 M€		
R&D	2019-2069	7 140 M€		
Recherche de site	2019-2069	5 641 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069, puis 2070-2099	3 003 M€		
Dont phase 2	2100 à 2118	2 639 M€		
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2099	1 944 M€		
Entreposage	2030-2197	5 960 M€		
Dont HA	2080-2197	554 M€		
Dont MA-VL	2030-2187	5 406 M€		

¹⁰² Pour le scénario OK, Jusqu'en 2070, puis à partir de 2170 ; pour le scénario KO, en 2019 puis à partir de 2100. Voir le chapitre 3.2.3 - *Scenarii* et prix relatifs du rapport pour plus de précisions.

Tableau Annexe 18.1-9Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.8

Type de coût	Année d'apparition des coûts	Coût en M€ ₂₀₁₉	Incertitude	Élasticité
Recherche et développement	2019-2069	7 140 M€	80-150 %	H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Recherche de site	2019-2099	3 003 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Dont phase 1	2019-2069 puis 2070-2099	3 003 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien des compétences	2019-2600	13 968 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Maintien du site	2019-2069	1 652 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
GIP	2019-2069	1 740 M€		H : 1 puis 0,1 I : 0,5 puis 0,05 B : 0
Entreposage	2030-2600	35 452 M€		H : 1,5 puis 0,3 I : 0,8 puis 0,2 B : 0,1
Dont entreposage MA-VL	2030-2600	29 732 M€		
Dont entreposage HA	2080-2600	5 719 M€		

18.2 Coûts unitaires de l'option 4

18.2.1 Coût de R&D

Dans l'ensemble des branches de l'option 4, nous mobilisons comme dans l'option 3, une estimation de 140 millions d'euros par an, soit un total de 7 140 millions d'euros entre 2019 et 2069.

18.2.2 Coût de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne

Dans l'ensemble des branches de l'option 4 et comme expliqué dans le chapitre 5.1.10 décrivant le coût unitaire de maintien du site actuel de Meuse/Haute-Marne, nous mobilisons une estimation de 32,4 millions d'euros par an, soit un total de 1 652 millions d'euros entre 2019 et 2069.

En effet, au-delà de 2070, cette dépense n'a plus lieu d'être, le site actuel de Meuse/Haute-Marne étant :

- soit conservé et utilisé pour le stockage géologique profond (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 – 4.1.b – 4.1.c et 4.3.b) ;
- soit conservé et non utilisé, le mode de gestion étant la technologie prospective (branche 4.1.d) ;
- soit perdu (branches 4.4 - 4.5 – 4.7 – 4.8).

18.2.3 Coût de maintien des compétences

Dans l'ensemble des branches de l'option 4, le coût de maintien des compétences est intégré à compter de 2019. Ce coût intervient sur des périodes différentes selon les caractéristiques des branches concernées, comme détaillé ci-après :

- de 2019 et jusqu'en 2069, dans les branches : 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b - 4.1.c et 4.3.b - 4.1.d et 4.2 :
Dans ces branches, une solution durable de gestion des déchets est trouvée en 2070 pour les déchets HA et MA-VL en 2070, que ce soit par stockage géologique profond ou *via* une technologie prospective. Le coût de maintien des compétences s'arrête donc en 2070 et s'élève à 1 224 millions d'euros entre 2019 et 2070.
- de 2019 et jusqu'en 2099, dans les branches 4.4. et 4.7 :
Dans ces branches, une solution durable de gestion des déchets est trouvée en 2100 pour les déchets HA et pour les déchets MA-VL, que ce soit par stockage géologique profond sur un nouveau site ou *via* une technologie prospective. Le coût de maintien des compétences s'arrête donc en 2100 et s'élève à 1 944 millions d'euros entre 2019 et 2099.
- de 2019 et jusqu'en 2600, dans les branches : 4.5 et 4.8 :
Dans ces branches, une solution durable de gestion des déchets n'est pas trouvée pour les déchets MA-VL et/ou pour les déchets HA, et le recours à de l'entreposage de longue durée renouvelé se poursuit. Le maintien des compétences dure donc également sur toute cette période allant de 2019 à 2600, période de la fin d'actualisation, pour un coût de total de 13 968 millions d'euros.

18.2.4 Coût de recherche de site

Plusieurs cas de figure de recherche d'un nouveau site peuvent être envisagés : la recherche d'un nouveau site peut avoir pour objectif la mise en place d'une technologie prospective, ou, la mise en place de Cigéo sur un nouveau site.

Par ailleurs, comme expliqué au sein du chapitre 5.1.3 décrivant le coût unitaire de recherche de site, cette recherche de site est divisée en deux phases ; la seconde phase de caractérisation du site au regard de la technologie employée n'étant enclenchée uniquement si la première phase est réussie, à savoir qu'un site est identifié.

Le coût unitaire de recherche de site intervient dans les branches suivantes :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Dans ces branches, la première phase de recherche de site pour une technologie prospective de forage profond est enclenchée en 2019 ; en 2070, aucune technologie prospective et/ou aucun site n'étant trouvé, la seconde phase n'est pas enclenchée.

Branches 4.1.b, 4.1.c et 4.3.b : les déchets HA ou MA-VL sont gérés soit par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, soit par une technologie prospective

Et branches 4.1.d. et 4.2 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, la première phase est enclenchée en 2019 ; en 2070, une technologie prospective et/ou un nouveau site ayant été identifié, la seconde phase de recherche de site pour une technologie prospective est également enclenchée.

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Cette branche présente la particularité de cumuler quatre phases de recherche de site :

- une première phase de recherche de site pour une technologie prospective entre 2019 et 2069 ; une technologie et un site sont trouvés pour les HA ;
- une seconde phase de recherche de site pour une technologie prospective pour les HA à partir de 2070 ;
- une première phase de recherche site pour un nouveau site de stockage géologique profond pour les MA-VL uniquement entre 2070 et 2099, recherche qui aboutit sur l'identification d'un site ;
- une seconde phase de recherche de site pour un nouveau site de stockage géologique profond pour les MA-VL à partir de 2100.

Branche 4.5 - les déchets MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Cette branche présente la particularité de cumuler trois phases de recherche de site :

- une première phase de recherche de site pour une technologie prospective entre 2019 et 2069 ; une technologie et un site sont trouvés pour les HA ;
- une seconde phase de recherche de site pour une technologie prospective pour les HA à partir de 2070 ;
- une première phase de recherche site pour un nouveau site de stockage géologique profond pour les MA-VL uniquement entre 2070 et 2099. Cette recherche n'aboutissant pas, la seconde phase n'est pas enclenchée.

Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site

Comme pour l'ensemble des branches de l'option 4, la première phase de recherche de site pour une technologie prospective est lancée en 2019. En 2070, la technologie prospective n'aboutit pas ; la première phase de recherche d'un nouveau site de stockage géologique profond est alors lancée. Celle-ci aboutit à l'identification d'un nouveau site en 2100 ; la seconde phase de recherche d'un site pour nouveau site de stockage géologique profond est donc lancée.

Branche 4.8 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé

Comme pour l'ensemble des branches de l'option 4, la première phase de recherche de site pour une technologie prospective est lancée en 2019. En 2070, la technologie prospective n'aboutit pas ; la première phase de recherche d'un nouveau site de stockage géologique profond est alors lancée. Celle-ci n'aboutit pas à l'identification d'un nouveau site en 2100 ; la seconde phase n'est donc pas enclenchée.

Le Tableau Annexe 18.2-1 ci-dessous récapitule les coûts de recherche de site par branche :

Tableau Annexe 18.2-1 Coût brut de recherche de site dans l'option 4

Coût brut de recherche de site dans l'option 4					
Solution de gestion	Technologie prospective	Technologie prospective	Stockage géologique profond sur un nouveau site	Stockage géologique profond sur un nouveau site	Coût brut total
Phase de recherche de site	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2	
Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6	1 653 M€				1 653 M€
Branches 4.1.b - 4.1.c et 4.3.b - 4.1.d et 4.2	1 653 M€	4 641 M€			6 294 M€
Branche 4.4	1 653 M€	4 641 M€	1 350 M€	2 639 M€	10 283 M€
Branche 4.5	1 653 M€	4 641 M€	1 350 M€		7 644 M€
Branche 4.7	1 653 M€		1 350 M€	2 639 M€	5 642 M€
Branche 4.8	1 653 M€		1 350 M€		3 003 M€

18.2.5 Coût de mise en place de Cigéo

Ce chapitre concerne le coût unitaire de mise en place de Cigéo pour une gestion des déchets radioactifs par stockage géologique profond, soit sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne parce que le site est conservé et qu'il n'y a pas d'autre technologie prospective disponible (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b - 4.1.c et 4.3.b), soit sur un nouveau site en cas de perte du site actuel de Meuse/Haute-Marne et de recherche fructueuse d'un nouveau site (branches 4.4 - 4.7).

Notons que, par hypothèse, le coût de mise en place de Cigéo n'intervient pas dans les branches 4.1.d et 4.2 (les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective), dans la branche 4.5 (les déchets MA-VL sont gérés par de l'entreposage de longue durée renouvelé et les déchets HA par une technologie prospective) et dans la branche 4.8 (les déchets radioactifs HA et MA-VL sont gérés par de l'entreposage de longue durée renouvelé).

Ainsi, le stockage géologique profond peut être déployé pour l'ensemble des déchets radioactifs ou seulement pour les HA ou pour les MA-VL, en fonction des résultats de la R&D relative à une technologie prospective. Différents cas se présentent et sont détaillés ci-après :

Coût de mise en place de Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne pour les déchets HA et les MA-VL, à partir de 2070 :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo à partir de 2070

Dans ces branches, le coût de mise en place de Cigéo est construit par période :

- de 2070 à 2090 (en décalé, la date de 2090 correspond à la date de 2040 en option de projet 1, soit la fin de la phase industrielle pilote) :
 - ✓ concernant les **coûts d'investissement**, les montants identiques à ceux intervenant entre 2019 et 2040 dans l'option de projet 1 sont repris, auquel il convient d'ajouter la construction du bâtiment EP2 dédié aux HA. En effet, celui-ci est construit dans ces branches entre 2070 à 2090 (soit plus rapidement qu'en option de projet 1, au sein de laquelle la construction ne démarre qu'en 2069), afin de permettre un démarrage plus rapide du stockage des déchets HA. Ceux-ci ayant suffisamment refroidi, leur stockage peut en effet commencer relativement plus rapidement qu'en option de projet 1 (18 ans et non 68 ans après le début des travaux) ;
 - ✓ s'agissant des **autres coûts**, les montants identiques à ceux intervenant entre 2019 et 2040 dans l'option de projet 1 sont repris
- de 2091 à 2155 :
 - ✓ concernant les coûts d'investissement, nous supposons des coûts identiques aux coûts d'investissement (hors démantèlement) de l'option de projet 1. Ceux-ci sont toutefois condensés sur 30 ans de moins, en raison du chevauchement des périodes de stockage des déchets MA-VL et HA : de 2040 à 2145 (soit 105 ans) en option de projet 1 et de 2081 à 2156 (soit 75 ans) en option 4 ;
 - ✓ s'agissant des autres coûts, nous condenseons les coûts de maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et assistance à maîtrise d'ouvrage de la période 2040-2145 de l'option de projet 1 sur la période 2091-2156. L'estimation du coût de l'assurance travaux est faite en utilisant le même coût annuel que dans l'option de projet 1. Les coûts annuels liés à la fiscalité sont estimés en utilisant la moyenne annuelle de la période de l'option de projet 1 pendant laquelle les déchets HA et MA-VL sont stockés de façon concomitante (entre 2080 et 2100) ; Enfin, les coûts liés aux activités sous maîtrise d'ouvrage Andra sont repris de l'option de projet 1 in extenso, mais appliqués à partir de 2070 ;
- de 2156 à 2165 : les coûts de démantèlement sont décalés à la période 2155 à 2165 ; ceux dépassant 2165 sont condensés sur les dix ans de fermeture (2156 à 2165) afin de maintenir le même coût brut, se terminant en 2165 ;

Sur l'ensemble de la période 2019-2166, le coût brut total de mise en place de Cigéo dans cette configuration s'établit à 25 518 millions d'euros ; pour rappel, le coût de mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1 est de 25 811 millions d'euros. L'économie très marginale observée résulte de légères réductions de coûts sur les postes de jouvence (inclus dans l'investissement) et de fiscalité dues à la réduction de la durée de fonctionnement. Les coûts d'exploitation et les coûts des activités sous maîtrise d'ouvrage Andra restent eux inchangés.

Coût de mise en place de Cigéo sur un nouveau site pour les déchets HA et les MA-VL, à partir de 2100 :

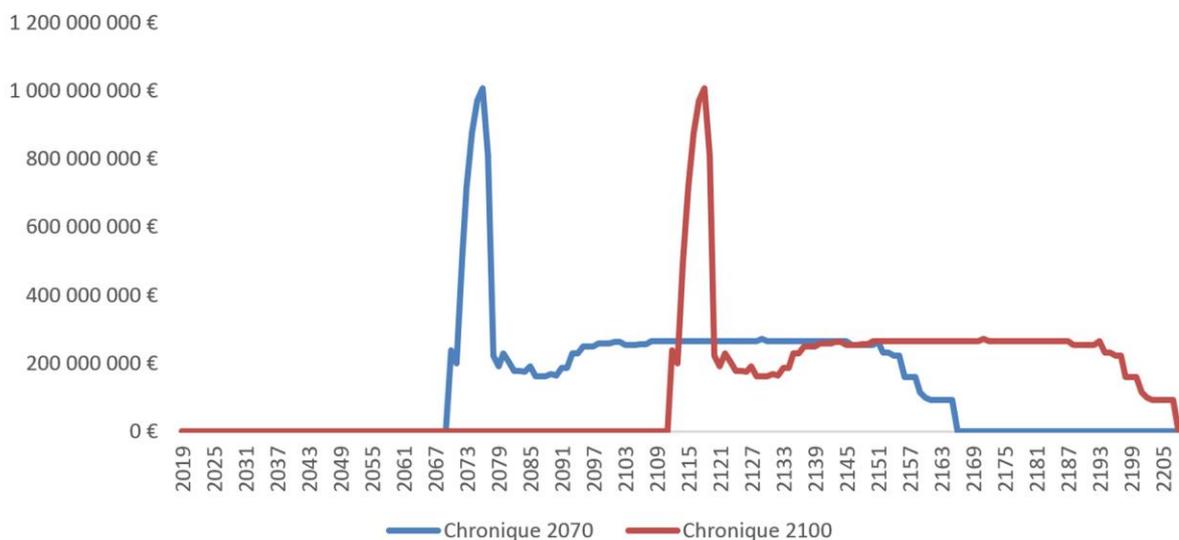
Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site à partir de 2100

Dans cette branche, un nouveau site de stockage profond est trouvé et accepté en 2100 pour gérer les déchets radioactifs. Nous posons l'hypothèse d'une douzaine d'années de recherche sur site (en référence aux douze ans écoulés entre 2007 et 2019 pour le site actuel de Cigéo en Meuse/Haute-Marne)¹⁰³ ; s'en suivent 20 ans de construction initiale et de phase industrielle pilote. La mise en stockage démarre en 2112, pour 65 ans avant la décision de démantèlement.

Ainsi, toute la chronique de coûts d'investissement et des autres coûts décrite précédemment pour les branches 4.1.a, 4.3.a, 4.6 est reprise et décalée de 42 ans.

Le coût brut total attaché à la mise en place de Cigéo estimé pour la branche 4.7 de l'option 4 s'élève à 25 518 millions d'euros.

¹⁰³ Cette phase de recherche sur site englobe une partie de la phase 2 de recherche de site pour Cigéo, qui quant à elle dure 19 ans, cette hypothèse est issue de la période comprise entre 2007 et 2025 (date estimée du décret d'autorisation de création).



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0120-B

Figure Annexe 18.2-1 Comparaison des chroniques des coûts de mise en place de Cigéo en 2070 dans les branches 4.1.a, 4.3.a, 4.6 et en 2100 dans la branche 4.7 de l'option 4

Coût de mise en place de Cigéo sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne pour les déchets MA-VL uniquement, à partir de 2070 et 2100 :

Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo à partir de 2070, et branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site en 2100 : les déchets HA étant gérés par une technologie prospective dans toutes ces branches

Le début de l'ensemble des lignes de coûts de la branche 2.1.b de l'option 2 (Cigéo uniquement pour les MA-VL) est décalé de 2019 à 2070. Une catégorie d'investissement (le process HA), intervenant avant 2070 au sein de l'option de projet 1, est supprimée. Cela réduit le coût brut très marginalement en supprimant des coûts d'investissement.

Pour le coût de la mise en place de Cigéo uniquement pour les déchets MA-VL à partir de 2100, le coût brut est identique, mais décalé à 2112 (prise de décision en 2100 + 12 ans de recherches sur site, voir le chapitre sur la branche 4.7 ci-dessus).

Le coût brut total attaché à la mise en place de Cigéo estimé pour les branches 4.1.c, 4.3.b et 4.4 de l'option 4 s'élève à 14 909 millions d'euros.

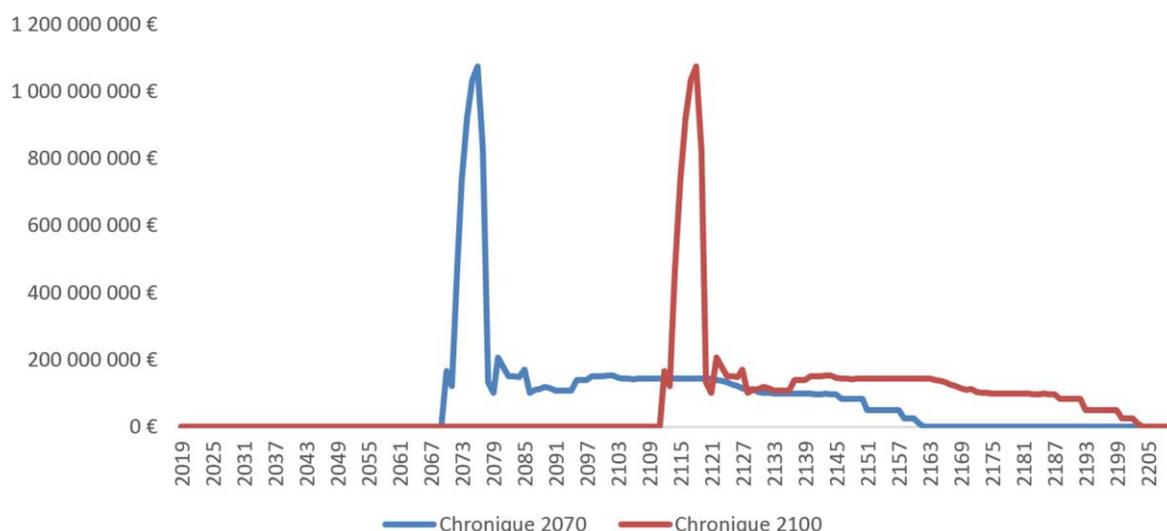


Figure Annexe 18.2-2 Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour les branches 4.1.c, 4.3.b et 4.4

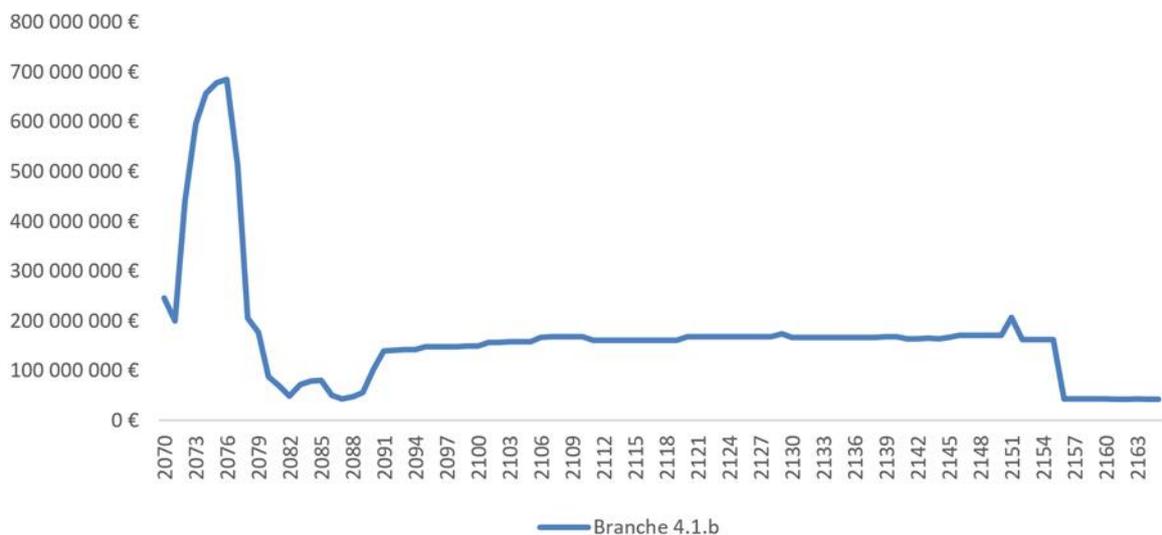
Coût de mise en place de Cigéo pour les déchets HA uniquement, à partir de 2070 :

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, à partir de 2070

- Le début de l'ensemble des lignes de coûts de l'option de projet 1 est décalé de 2019 à 2070. Les changements suivants y sont ensuite apportés :
- Concernant les coûts d'investissement, le coût du process MA-VL, de EP1, du bloc 3 de EP1 sont ramenés à zéro. Par ailleurs, l'échéancier est modifié de la manière suivante :
 - ✓ Pour les coûts relatifs au process nucléaire :
 - Les coûts entre 2070 et 2091 (correspondant à la période 2019-2040 en option de projet 1) sont conservés à l'identique.
 - Les coûts survenant à partir de 2079 en option de projet 1 (soit un an avant le fonctionnement en option de projet 1) sont placés en option 4 à partir de 2090 (soit un an avant le fonctionnement en option 4).
 - ✓ Pour les coûts relatifs aux bâtiments nucléaires de surface :
 - Les coûts entre 2070 et 2091 (correspondant à la période 2019-2040 en option de projet 1) sont conservés à l'identique.
 - Les coûts survenant à partir de 2079 en option de projet 1 (soit un an avant le fonctionnement en option de projet 1) sont placés en option 4 à partir de 2090 (soit un an avant le fonctionnement en option 4).
 - ✓ Pour les coûts relatifs aux installations conventionnelles de surface ; aux liaisons surface-fond et ouvrages souterrains ; aux installations transverses :
 - Les coûts de construction et de renouvellement sont concentrés sur la période 2091 à 2155 (fonctionnement).
 - Pour la zone de stockage HA :
 - Les coûts entre 2070 et 2091 (correspondant à la période 2019-2040 en option de projet 1) sont conservés à l'identique.
 - Les coûts survenant à partir de 2079 en option de projet 1 (soit un an avant le fonctionnement en option de projet 1) sont placés en option 4 à partir de 2090 (soit un an avant le fonctionnement en option 4).

- ✓ Pour les coûts de maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage, nous reprenons les ratios développés pour la définition du coût de Cigéo en options 2 et 3 : 2,4 % du montant d'investissement pour la maîtrise d'œuvre de conception, 10 % pour la maîtrise d'œuvre de réalisation, 2,4 % pour l'assistance à maîtrise d'ouvrage règlementaire et 3 % pour l'assistance à maîtrise d'ouvrage de suivi de travaux
- ✓ Pour les coûts d'assurances, nous supposons un montant annuel identique à l'option de projet 1 jusqu'à la fermeture ;
- ✓ Pour les impôts et les taxes :
 - Les impôts et taxes pour les déchets HA uniquement sont supposés égaux à la différence entre le coût des impôts et des taxes uniquement pour les déchets MA-VL (voir chapitre 16.2.1 pour précisions de calcul) et le coût total des impôts et des taxes, soit 1 687 millions d'euros.
 - Nous supposons que la taxe sur les installations nucléaires de base (INB), la taxe dite « de stockage », la contribution IRSN et la cotisation sur la valeur ajoutée des entreprises (CVAE) sont lissés sur la période [20 ans avant le début du fonctionnement - fin du fonctionnement], comme en option de projet 1 ; les taxes foncières, la cotisation foncière des entreprises (CFE) et le dégrèvement relatif à la contribution économique territoriale sont lissés sur la période [10 ans avant le début de fonctionnement - fin de fonctionnement], également comme en option de projet 1.
- ✓ Pour le coût de fonctionnement :
Le coût de fonctionnement pour les déchets HA uniquement est supposé égal à la différence entre le coût de fonctionnement uniquement pour les déchets MA-VL (voir rapport pour précisions de calcul) et le coût total de fonctionnement.
- ✓ Pas de modification des coûts des activités connexes sous maîtrise d'ouvrage Andra.

Le coût brut total attaché à la mise en place de Cigéo estimé pour la branche 4.1.b de l'option 4 s'élève à 16 183 millions d'euros.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0057-A

Figure Annexe 18.2-3 Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour la branche 4.1.b

18.2.6 Coût de technologie prospective

Coût d'une technologie prospective pour les déchets HA et MA-VL à partir de 2070 :

Branches 4.1.d et 4.2 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Ces branches sont identiques à la branche 3.1.a de l'option 3 pour les déchets HA et MA-VL, en coût brut et en chronique.

On note ainsi un coût brut d'une technologie prospective de 50 436 millions d'euros.

Coût d'une technologie prospective pour les HA uniquement :

Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.5 - les déchets MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Dans cette branche, l'ensemble des déchets HA (HA1/HA2 et HA0) sont gérés par la technologie prospective. On note donc un coût légèrement supérieur aux branches 2.1.b, 3.1.c et 3.2.a (dans ces branches, seuls les déchets HA, hors HA0, sont gérés par la technologie prospective).

On note ainsi un coût brut d'une technologie prospective de 11 784 millions d'euros.

Typologie de coût	Coût brut d'une technologie prospective pour les déchets HA et HA0 uniquement
Coût de mise en forage profond HA	10 087 M€
Coût annexe au forage profond	1 697 M€
Coût brut total	11 784 M€

Coût d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL uniquement :

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

En prenant en compte uniquement les coûts du processus de densification et de mise en forage profond relevant des déchets MA-VL, et des coûts annexes (investissement, assurances travaux – maîtrise d'œuvre et d'ouvrage, fiscalité identiques à la mise en forage profond des déchets HA), nous obtenons un coût de 39 832 millions d'euros pour la mise en place de la technologie prospective pour les MA-VL dans la branche 4.1.b de l'option 4.

Les différentes composantes sont listées dans le tableau ci-dessous. On note que, si les coûts de mise en forage profond et les coûts liés à la densification pour les déchets MA-VL sont identiques aux coûts estimés pour ces mêmes catégories de déchets en option 3.1.a, les coûts annexes, eux, sont plus faibles. Ils correspondent aux mêmes coûts annexes que ceux estimés dans le cas où seuls les déchets HA sont stockés en forage profond (branches 2.1.a, 3.1.b et 3.2.a).

Tableau Annexe 18.2-2 Coût brut d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL uniquement

Typologie de coût	Coût brut d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL uniquement
Coût du processus de densification	1 443 M€
Coût de mise en forage profond MA-VL	36 658 M€
Coût annexe au forage profond	1 697 M€
Coût brut total	39 798 M€

18.2.7 Coût de transport

Coût de transport des déchets HA vers Cigéo à partir de 2090 :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Dans ces branches, la phase de fonctionnement de Cigéo pour les déchets HA est décalée de 10 ans par rapport à l'option de projet 1. Le transport en phase industrielle pilote est décalé aux années 2082 à 2086 ; le transport en phase industrielle entre 2091 et 2155.

Coût de transport des déchets MA-VL vers Cigéo à partir de 2081 ou 2123 :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

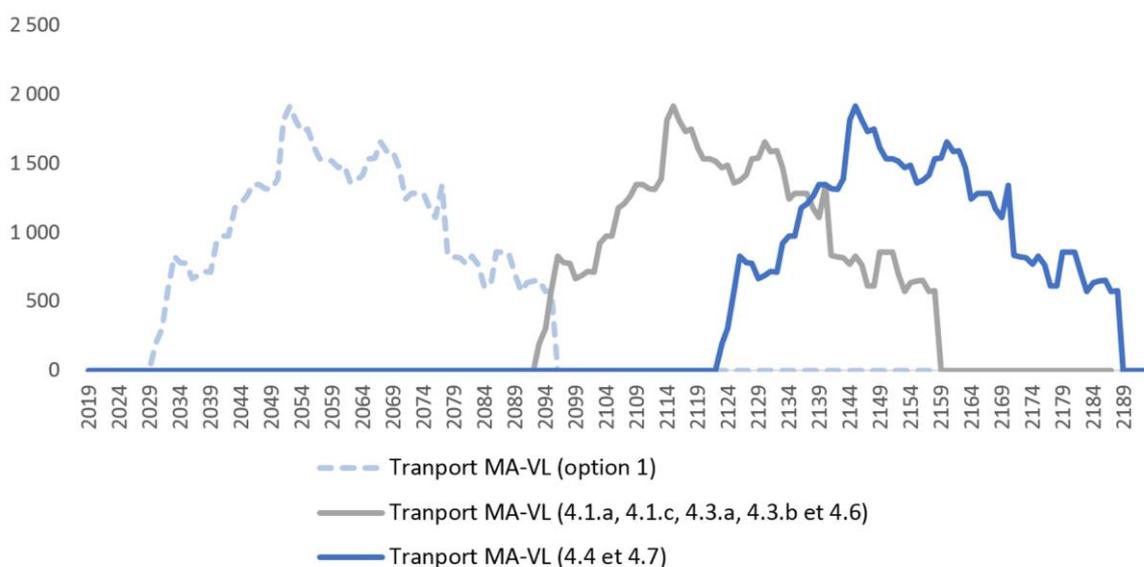
Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site

Dans ces branches, les opérations de premier stockage dans Cigéo pour les déchets MA-VL et HA0 sont décalées par rapport à l'option de projet 1 d'une cinquantaine d'années (dans les branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b) et de près de 100 ans (dans les branches 4.4 et 4.7). Elles commencent ainsi respectivement en 2081 ou en 2123¹⁰⁴, contre 2030 pour Cigéo. La chronique est ensuite identique à celle de Cigéo, ainsi que le coût brut.

¹⁰⁴ La date de 2123 part d'une décision en 2100, à laquelle s'ajoute une période de 12 ans de recherche sur site, puis de 11 ans avant le lancement de la phase industrielle pilote.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0123-B

Figure Annexe 18.2-4 Comparaison des chroniques de transport des déchets MA-VL dans les branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b - 4.4 et 4.7, et dans l'option de projet 1, en m³

Coût de transport des déchets HA vers Cigéo à partir de 2124 :

Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site

Dans cette branche, les déchets HA (HA1/HA2) et HA0 sont stockés sur un nouveau site de stockage géologique profond à partir de 2124, au lieu de 2031 dans l'option de projet 1. Cela correspond à un décalage de la décision de lancer Cigéo à 2100, suivie de 12 ans de recherche sur site et 11 ans de construction initiale avec le lancement de la phase industrielle pilote.

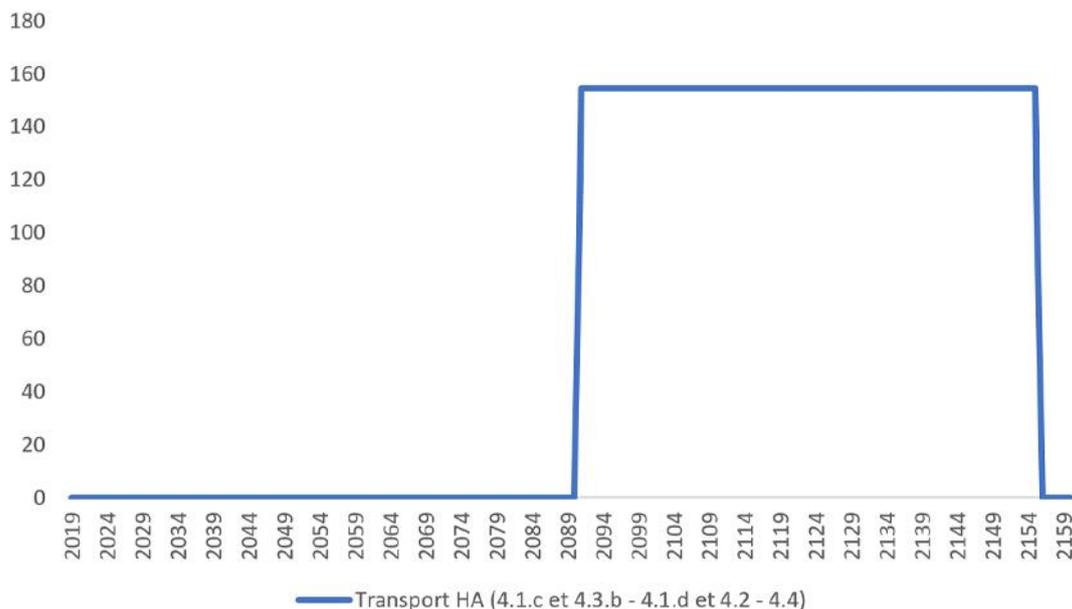
Coût de transport des déchets HA à partir de 2091 vers une technologie prospective :

Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branches 4.1.d, et 4.2 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, les déchets HA sont stockés avec un décalage d'une dizaine d'années par rapport à l'option de projet 1. Par ailleurs, sans plus d'informations sur la chronique potentielle de transport et de réception des colis pour ce type de technologie prospective, la chronique de transport des déchets HA, est légèrement modifiée, selon une hypothèse de répartition annuelle constante sur la durée totale de 65 ans (hypothèse également posée pour l'ensemble des autres branches menant à une technologie prospective pour les déchets HA).



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0125-B

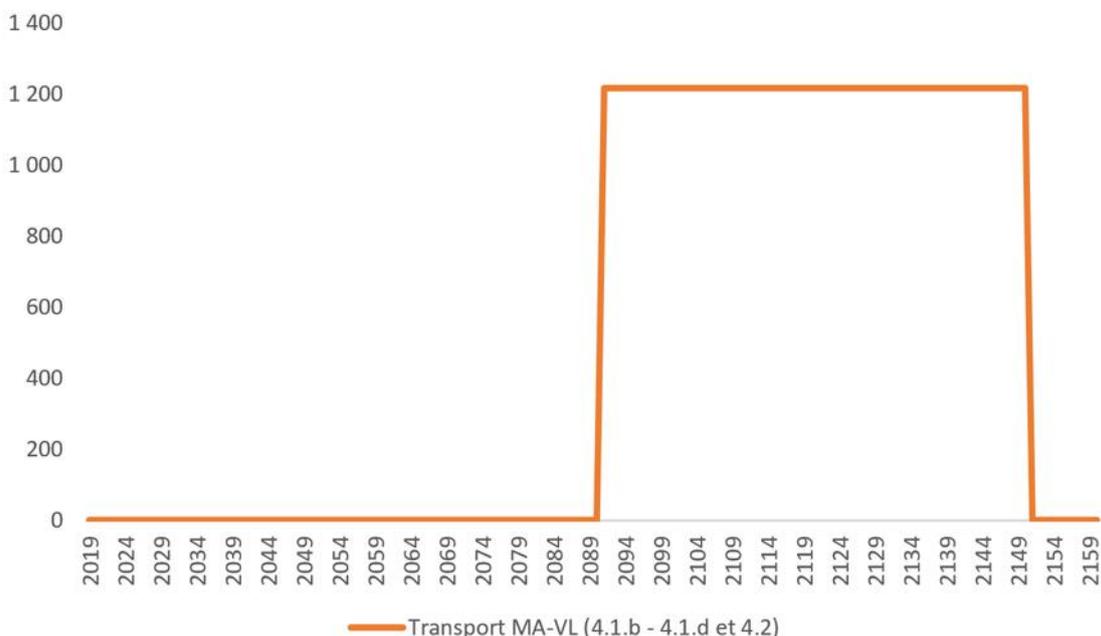
Figure Annexe 18.2-5 Chronique de transport des déchets HA des branches 4.1.c et 4.3.b - 4.1.d et 4.2 - 4.4, en m³

Coût de transport des déchets MA-VL vers une technologie prospective à partir de 2091 :

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Branches 4.1.d, et 4.2 – les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, les déchets MA-VL sont évacués des sites d'entreposage à partir de 2091, versus 2030 pour l'option de projet 1. On note ainsi un décalage d'une soixantaine d'années ; la chronique est également modifiée (comme pour les déchets HA, nous supposons un envoi en volume constant, sur une durée totale demeurée inchangée de 60 ans).



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0126-B

Figure Annexe 18.2-6 Chronique de transport des déchets MA-VL des branches 4.1.b - 4.1.d et 4.2, en m³

Tableau Annexe 18.2-3 Coût brut de transport dans l'option 4

Branche de l'option 4	Coût brut de transport
Branches 4.1.a, 4.3.a, et 4.6	
Branche 4.1.b	1 473 M€
Branches 4.1.c et 4.3.b	dont :
Branches 4.1.d et 4.2	1 241 M € (MA-VL)
Branche 4.4	231 M€ (HA)
Branche 4.7	
Branche 4.5	231 M€
Branche 4.8	-

18.2.8 Coût d'entreposage

Dans ce chapitre, nous estimons les coûts d'entreposage des déchets HA et MA-VL. Ceux-ci diffèrent de l'option de projet 1 en raison de la mise en place plus tardive (quand c'est le cas) de la solution de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs (soit par stockage géologique profond soit par recours à une technologie prospective). Ces décalages génèrent des surcoûts d'entreposage, à la fois en matière

de fonctionnement et d'investissement des installations temporaires d'entreposage, qui restent nécessaires plus longtemps.

Coût d'entreposage en vue du stockage géologique profond des déchets HA à partir de 2091 :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Dans ces branches, la mise en place du stockage géologique profond sur le site actuel de Meuse/Haute-Marne est décalée de 2019 à 2070 ; le stockage des premiers déchets radioactifs de la phase industrielle pilote est donc décalé de 2031 à 2082. La phase industrielle de leur stockage est décalée de 2080 à 2091.

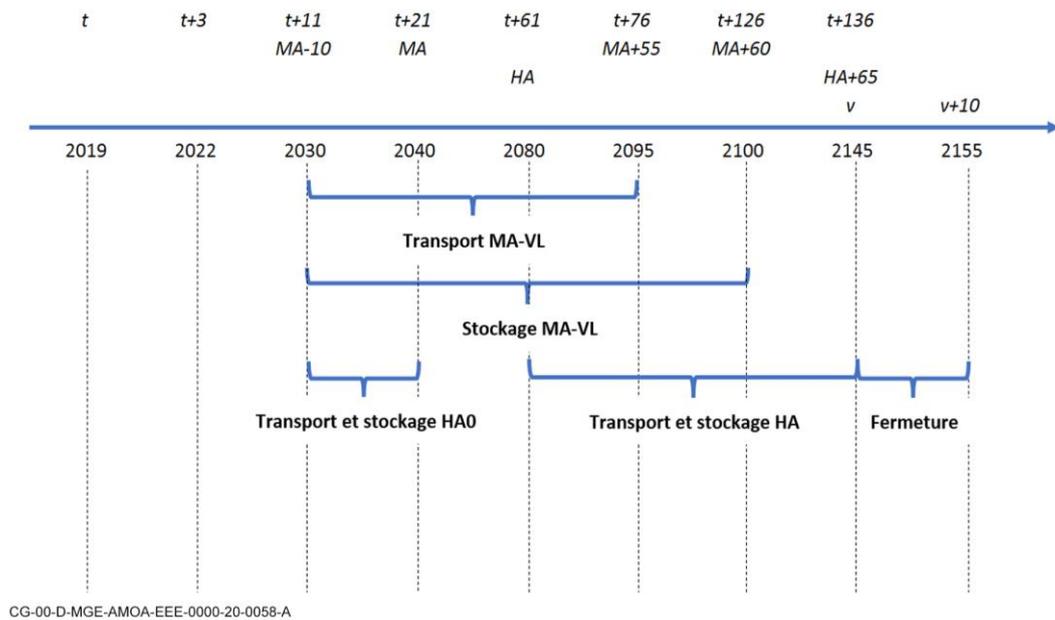
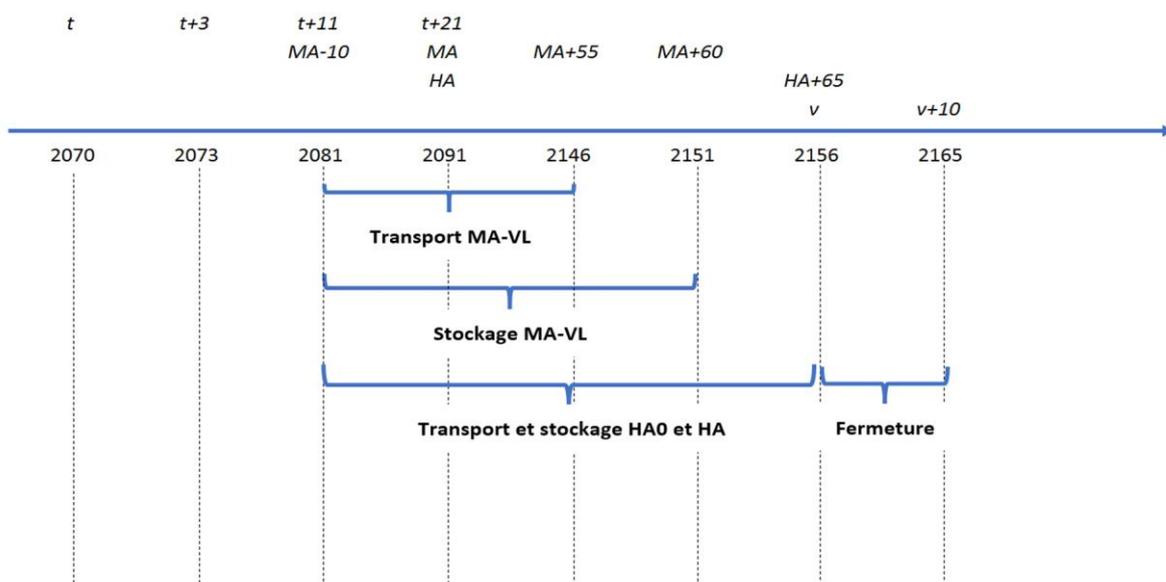


Figure Annexe 18.2-7 Calendrier de la mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0127-B

Figure Annexe 18.2-8 Calendrier de la mise en place de Cigéo pour les branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b

On note donc que les déchets HA, dans leur immense majorité, sont ensuite stockés en couche géologique profonde à partir de 2091, et non 2080, comme en option de projet 1, soit un décalage de 11 ans. Le surcoût d'entreposage sur cette période est donc identique à celui estimé dans les branches 3.1.a et 3.1.b de l'option 3. On note que le surcoût d'entreposage pour les déchets HAO (phase industrielle pilote) n'a pas été pris en considération ; par simplification, et au vu du poids de ces déchets dans l'inventaire HA complet (environ 1 %).

Tableau Annexe 18.2-4 Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond	
Solution de gestion pour les déchets HA	Stockage géologique profond
Typologie de coût des déchets HA	Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b
Surcoût d'investissement	-
Surcoût de fonctionnement	48 M€
Coût brut total	48 M€

Coût d'entreposage en vue du stockage géologique profond des déchets MA-VL à partir de 2081 :

Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, les premiers déchets MA-VL (et HA0) sont stockés à partir de 2081, et non 2030, soit un décalage d'environ 50 ans. On note qu'un décalage de 50 ans a été étudié au sein de la branche 3.1.a de l'option 3.

La branche 3.1.a diverge toutefois légèrement des branches considérées ici, dans la mesure où aucun surcoût d'entreposage des premiers déchets de la phase industrielle pilote n'est nécessaire dans l'option 3. En effet, la phase industrielle pilote est effectuée au même moment dans l'option de projet 1 et dans l'option 3 : par conséquent, les producteurs désentreposent au même moment ces premiers déchets destinés au stockage lors de la phase industrielle pilote, et ne subissent donc pas de surcoût lié à leur entreposage.

Ceci n'est pas le cas des branches de l'option 4 considérées ici, où la phase industrielle pilote intervient avec un décalage de 50 ans, nécessitant pour les producteurs de prolonger l'entreposage de ces déchets d'une durée équivalente. Toutefois, les premiers déchets de la phase industrielle pilote représentent une partie infime des déchets prévus dans l'inventaire de référence (environ 5 %, selon le PIGD version E). Nous posons donc l'hypothèse simplificatrice et conservatrice que le surcoût d'entreposage sera identique à celui estimé en option 3.

Les surcoûts d'entreposage sont estimés comme suit :

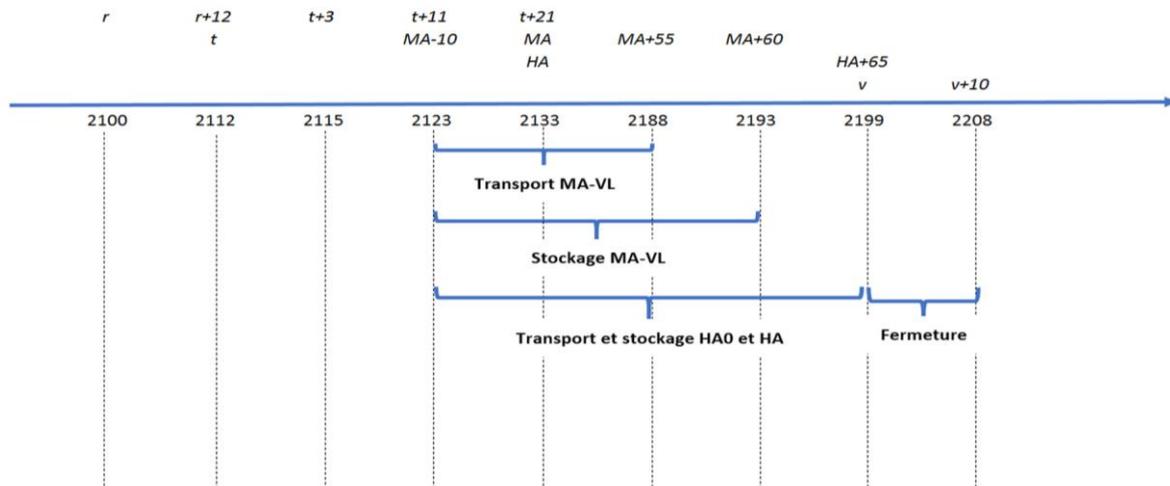
Tableau Annexe 18.2-5 Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond	
Solution de gestion pour les déchets MA-VL	Stockage géologique profond
Typologie de coût	Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b
Surcoût d'investissement	1 406 M€
Surcoût de fonctionnement	1 749 M€
Coût brut total	3 155 M€

Coût d'entreposage en vue du stockage géologique profond des déchets HA dans un nouveau site à partir de 2130 :

Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site

Dans cette branche, les déchets HA sont stockés en couche géologique profonde dans un nouveau site à partir de 2124 (phase industrielle pilote), et la phase industrielle de stockage démarre en 2133. En option de projet 1, le stockage des déchets en phase industrielle commence en 2080 ; on note ainsi une cinquantaine d'années de décalage.



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0128-B

Figure Annexe 18.2-9 Calendrier de la mise en place de Cigéo pour la branche 4.7

Les surcoûts d'entreposage sont estimés comme suit :

Tableau Annexe 18.2-6 Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond sur nouveau site (dans la branche 4.7), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond sur nouveau site	
Solution de gestion pour les déchets HA	Stockage géologique profond sur nouveau site
	Branche 4.7
Surcoût d'investissement	238 M€
Surcoût de fonctionnement	316 M€
Coût brut total	554 M€

Coût d'entreposage en vue du stockage géologique profond des déchets MA-VL sur un nouveau site à partir de 2123 :

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.7 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site

Les déchets MA-VL sont stockés dans une couche géologique profonde sur un nouveau site à partir de 2133, et non 2040, soit un décalage et un allongement de la durée d'entreposage d'environ 90 ans par rapport à l'option de projet 1.

Les surcoûts d'entreposage sont estimés comme suit :

Tableau Annexe 18.2-7 Coût d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond sur nouveau site (dans les branches 4.4 et 4.7), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond sur nouveau site	
Solution de gestion pour les déchets MA-VL	Stockage géologique profond sur nouveau site
	Branches 4.4 et 4.7
Surcoût d'investissement	2 267 M€
Surcoût de fonctionnement	3 138 M€
Coût brut total	5 406 M€

Coût d'entreposage en vue du stockage des déchets HA dans une technologie prospective à partir de 2090 :

Branches 4.1.c et 4.3.b - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branches 4.1.d. et 4.2 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.4 - les déchets MA-VL sont gérés par stockage géologique profond sur un nouveau site et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.5 - les déchets MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, les déchets HA sont stockés à partir de 2091, au lieu de 2080 dans l'option de projet 1 ; on note donc un décalage et un allongement de la durée d'entreposage d'une dizaine d'années. Les surcoûts d'entreposage sont identiques à ceux identifiés pour la branche 3.1.a de l'option 3.

Coût d'entreposage en vue du stockage des déchets MA-VL à partir de 2090 dans une technologie prospective :

Branche 4.1.b - les déchets MA-VL sont gérés par une technologie prospective, les déchets HA sont gérés par stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo

Branche 4.1.d et 4.2 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par une technologie prospective

Dans ces branches, les premiers déchets MA-VL sont stockés à partir de 2090, au lieu de 2030 dans la phase industrielle pilote de l'option de projet 1. On note donc un décalage de 60 ans de la mise en stockage des déchets MA-VL. Les surcoûts d'entreposage sont estimés comme suit :

Tableau Annexe 18.2-8 Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par technologie prospective (dans les branches 4.1.b - 4.1.d et 4.2) en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par technologie prospective	
Solution de gestion pour les déchets MA-VL	Technologie prospective
	Branches 4.1.b - 4.1.d et 4.2
Surcoût d'investissement	1 709 M€
Surcoût de fonctionnement	2 046 M€
Coût brut total	3 756 M€

Coût d'entreposage dans le cadre de l'entreposage renouvelé de longue durée des déchets MA-VL :

Branche 4.5 - les déchets MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé et les déchets HA sont gérés par une technologie prospective

Branche 4.8 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé

Dans ces branches, aucune technologie prospective n'a été trouvée pour les déchets MA-VL, ni, dans la branche 4.8, pour les déchets HA. Par ailleurs, le site actuel de Cigéo en Meuse/Haute-Marne est perdu et la recherche d'un nouveau site est infructueuse. Ainsi, les déchets MA-VL (et HA pour l'option 4.8) sont entreposés continuellement, ce qui entraîne des surcoûts à la fois d'investissement et de fonctionnement.

Tableau Annexe 18.2-9 Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par entreposage de longue durée renouvelé (dans les branches 4.5 et 4.8), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par entreposage de longue durée renouvelé	
Solution de gestion pour les déchets MA-VL	Entreposage de longue durée renouvelé
Typologie de coût	Branches 4.5 et 4.8
Surcoût d'investissement	7 939 M€
Surcoût de fonctionnement	21 764 M€
Coût brut total	29 748 M€

Coût d'entreposage dans le cadre de l'entreposage renouvelé de longue durée des déchets HA :

Branche 4.8 - les déchets HA et MA-VL sont gérés par entreposage de longue durée renouvelé

Tableau Annexe 18.2-10 Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par entreposage de longue durée renouvelé (dans la branche 4.8), en millions d'euros₂₀₁₉

Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par entreposage de longue durée renouvelé	
Solution de gestion pour les déchets HA	Entreposage de longue durée renouvelé
Typologie de coût	Branche 4.8
Surcoût d'investissement	2 924 M€
Surcoût de fonctionnement	2 795 M€
Coût brut total	5 719 M€

Surcoûts d'entreposage générés par l'ensemble des branches de l'option 4 :

Tableau Annexe 18.2-11 Coût d'entreposage des branches de l'option 4

Option 4	MA-VL		HA		Surcoût d'entreposage
	Solution de gestion	Surcoût	Solution de gestion	Surcoût	
Branche 4.1.a	Stockage géologique profond en 2070	3 155 M€	Stockage géologique profond en 2070	48 M€	3 203 M€
Branche 4.1.b	Technologie prospective en 2070	3 756 M€	Stockage géologique profond en 2070	48 M€	3 804 M€
Branche 4.1.c	Stockage géologique profond en 2070	3 155 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	3 203 M€
Branche 4.1.d	Technologie prospective en 2070	3 756 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	3 804 M€
Branche 4.2	Technologie prospective en 2070	3 756 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	3 804 M€
Branche 4.3.a	Stockage géologique profond en 2070	3 155 M€	Stockage géologique profond en 2070	48 M€	3 203 M€
Branche 4.3.b	Stockage géologique profond en 2070	3 155 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	3 203 M€
Branche 4.4	Stockage géologique profond sur nouveau site en 2100	5 406 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	5 453 M€
Branche 4.5	Entreposage de longue durée renouvelé	29 732 M€	Technologie prospective en 2070	48 M€	29 780 M€
Branche 4.6	Stockage géologique profond en 2070	3 155 M€	Stockage géologique profond en 2070	48 M€	3 203 M€
Branche 4.7	Stockage géologique profond sur nouveau site en 2100	5 405 M€	Stockage géologique profond sur nouveau site en 2100	555 M€	5 960 M€

Option 4	MA-VL		HA		Surcoût d'entreposage
	Solution de gestion	Surcoût	Solution de gestion	Surcoût	
Branche 4.8	Entreposage de longue durée renouvelé	29 732 M€	Entreposage de longue durée renouvelé	5 720 M€	35 452 M€

Après avoir détaillé l'ensemble des coûts unitaires des différentes branches constitutives de l'option 4, le chapitre suivant fournit des représentations graphiques des coûts actualisés, selon les différents taux d'actualisation et dans le cadre des deux *scenarii* envisagés. L'évolution des prix relatifs et l'approche probabiliste de Monte-Carlo, qui permettent de tenir compte des risques sur les coûts, sont intégrées.

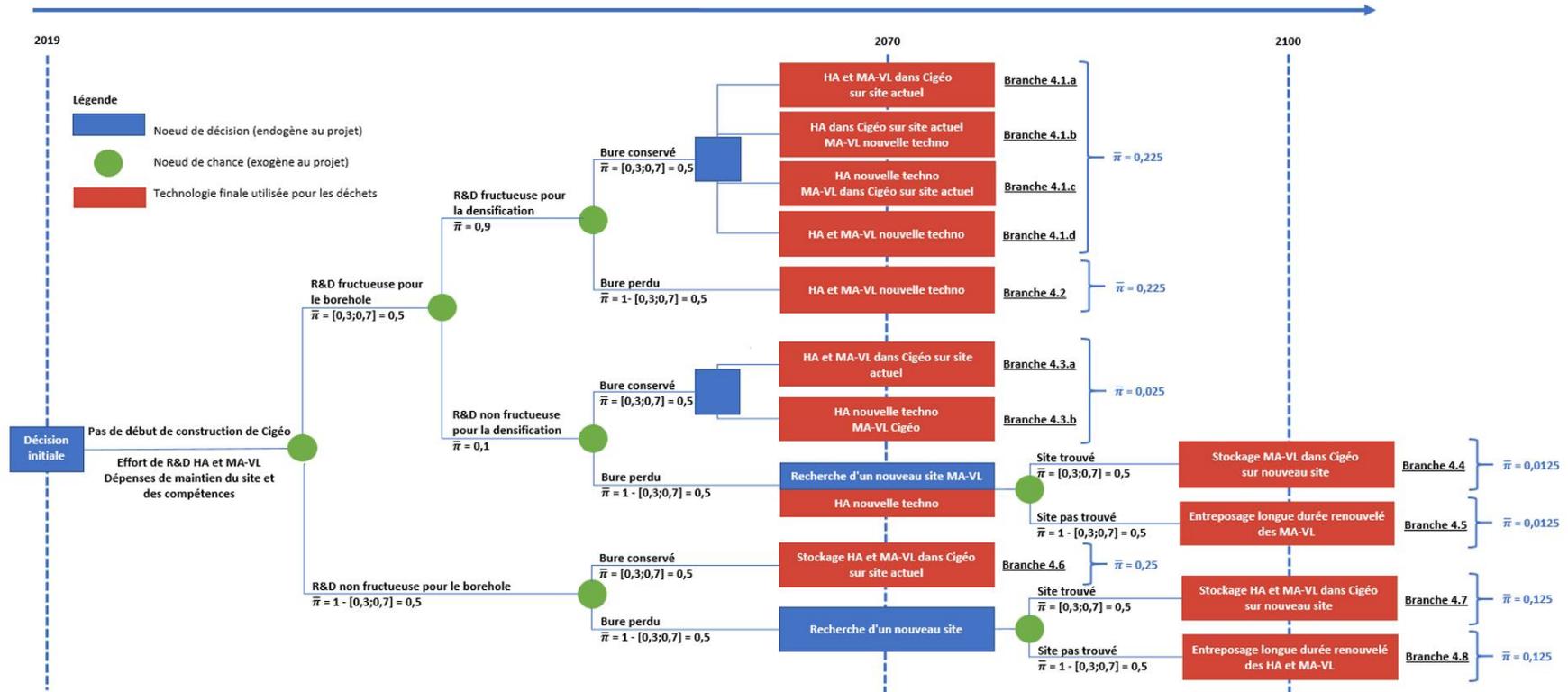
18.3 Coût actualisé de l'option 4

Après une présentation des probabilités d'occurrence des branches de l'option 4 dans le chapitre 18.3.1, le chapitre 18.3.2 traite du scénario OK, tandis que le chapitre 18.3.3 traite du scénario KO. Rappelons que ces chapitres ne traitent que des coûts de mise en place des solutions de gestion (stockage géologique profond, technologie prospective ou entreposage de longue durée renouvelé). Les coûts liés au risque d'accident ne sont pas pris en compte à ce stade. Le chapitre 18.3.4 permet de visualiser les résultats en tenant compte du coût probabilisé de l'accident (incendie en entreposage) dans les branches 4.5 et 4.8. Voir les chapitres 6 et 7 pour les détails relatifs à l'accident et l'analyse coûts-bénéfices comparant les options entre elles.

Annexes

18.3.1 Probabilité d'occurrence des branches de l'option 4

Le graphique suivant rappelle, pour toutes les branches, les hypothèses de probabilités d'occurrence qui ont été retenues.



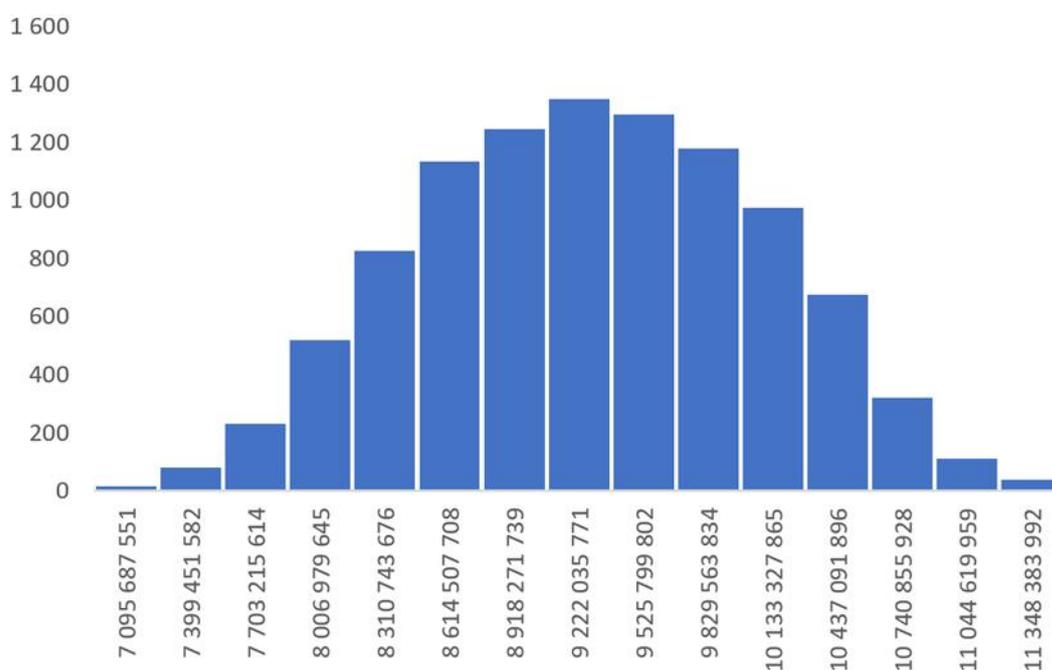
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0130-B

Figure Annexe 18.3-1 Hypothèses de probabilité d'occurrence des branches de l'option 4

18.3.2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

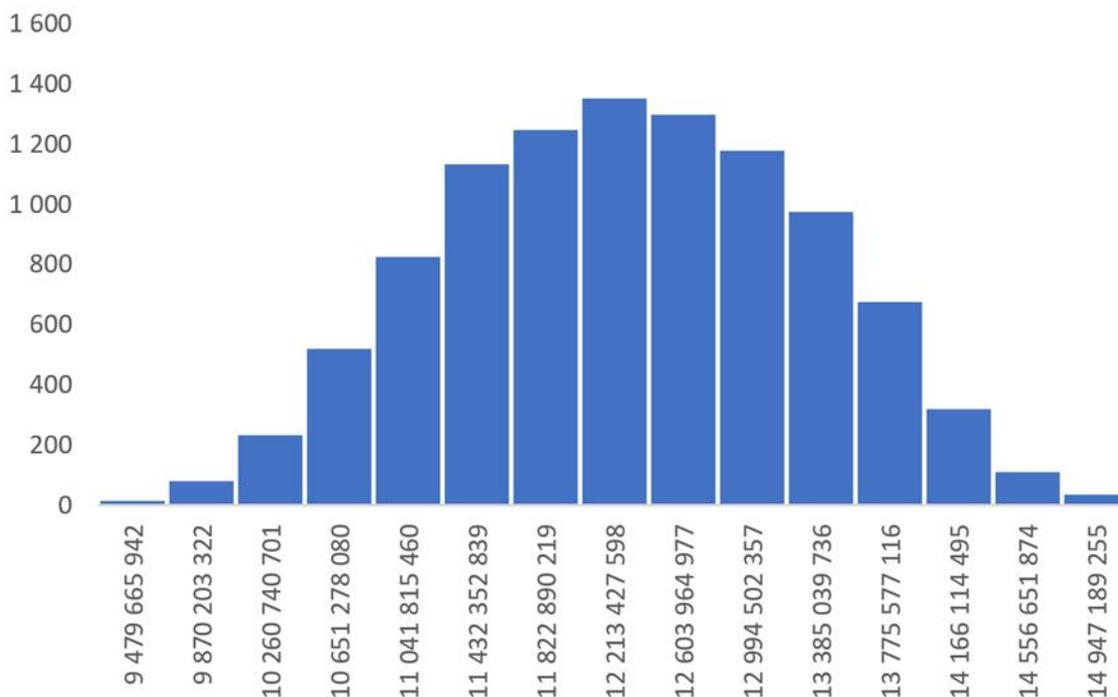
Tableau Annexe 18.3-1 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK

Option 4 Scénario OK	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	9 019 M€	809 M€	6 791 M€	11 384 M€	7 716 M€ ; 10 329 M€
Actualisation intermédiaire	12 096 M€	1 026 M€	9 098 M€	14 947 M€	10 434 M€ ; 13 752 M€
Actualisation basse	17 133 M€	1 296 M€	13 168 M€	21 249 M€	14 980 M€ ; 19 275 M€



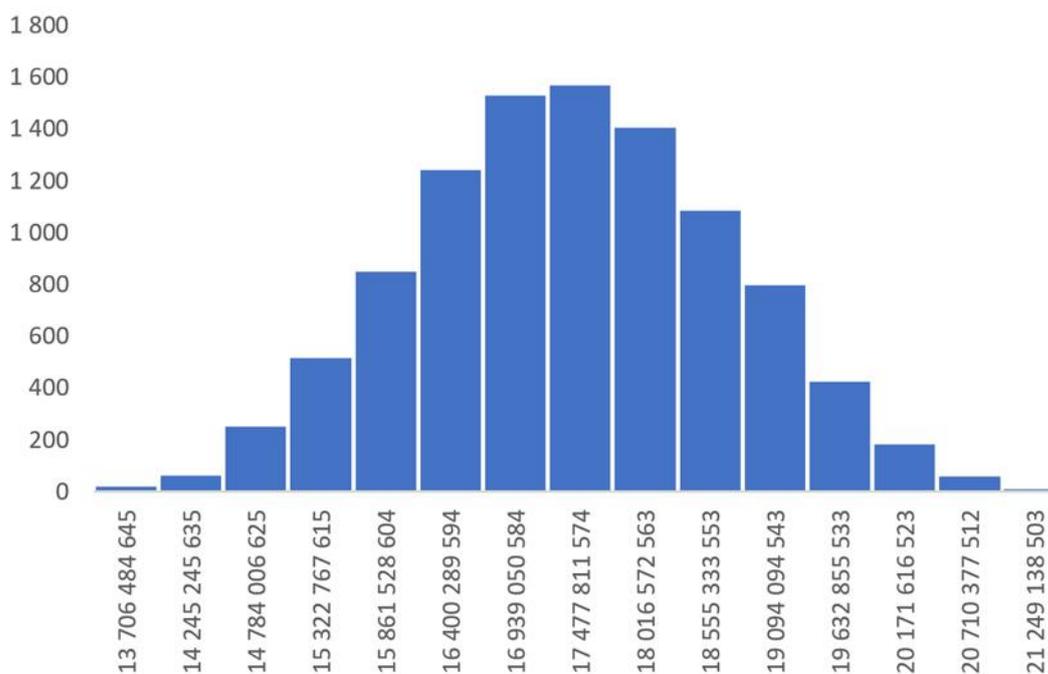
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0131-B

Figure Annexe 18.3-2 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario OK



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0053-A

Figure Annexe 18.3-3 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario OK



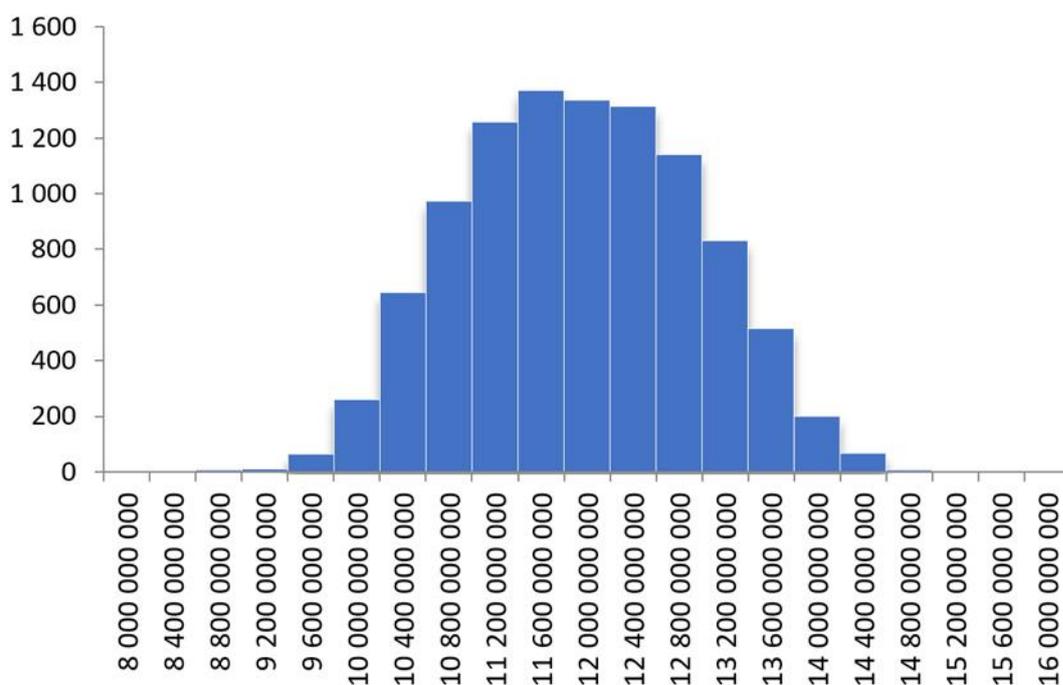
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0132-B

Figure Annexe 18.3-4 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario OK

18.3.3 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident

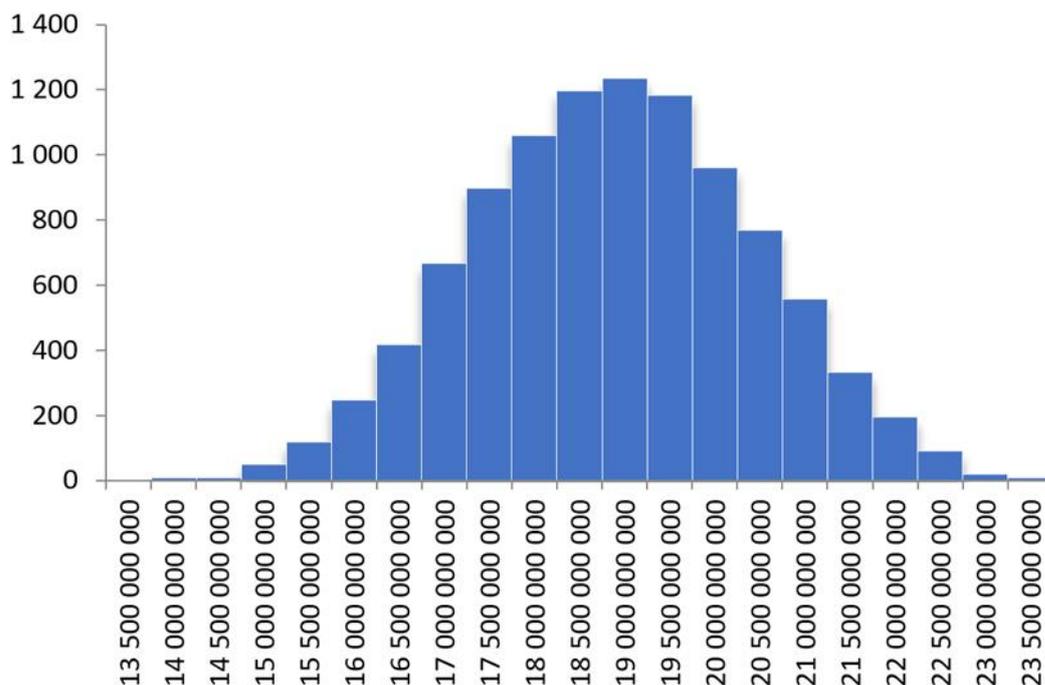
Tableau Annexe 18.3-2 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident

Option 4 Scénario KO sans accident	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	11 739 M€	1 001 M€	8 701 M€	14 681 M€	10 108 M€ ; 13 364 M€
Actualisation intermédiaire	18 638 M€	1 531 M€	14 026 M€	23 141 M€	16 081 M€ ; 21 184
Actualisation basse	34 455 M€	2 722 M€	25 595 M€	42 799 M€	29 334 M€ ; 38 842 M€



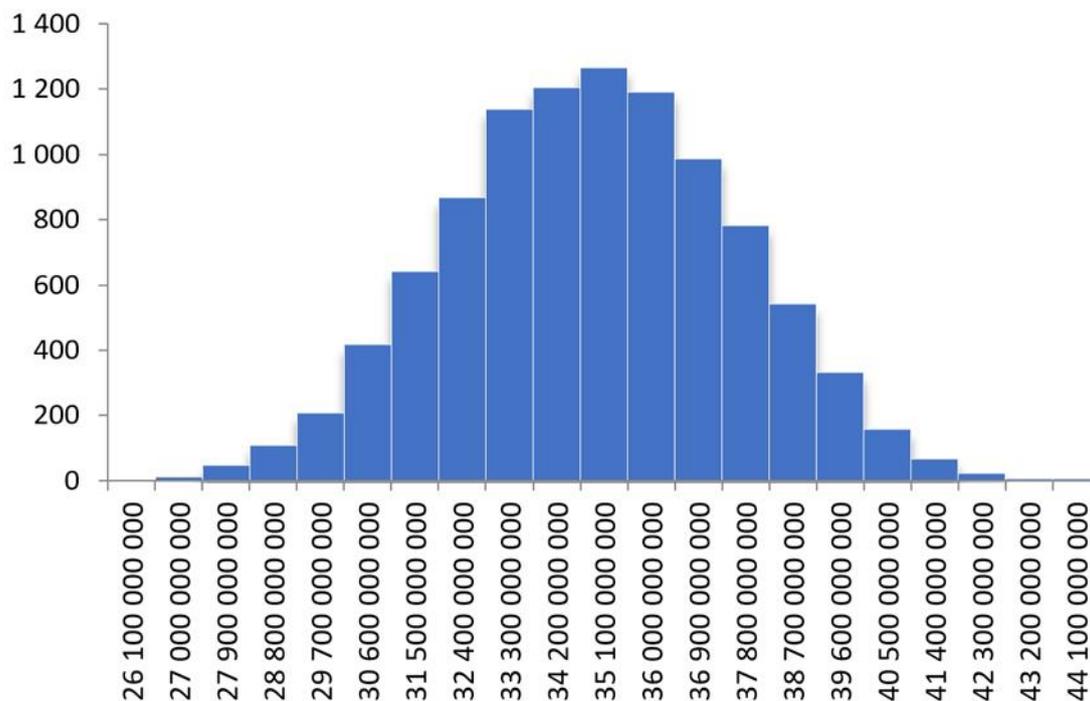
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0133-B

Figure Annexe 18.3-5 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0048-A

Figure Annexe 18.3-6 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0047-A

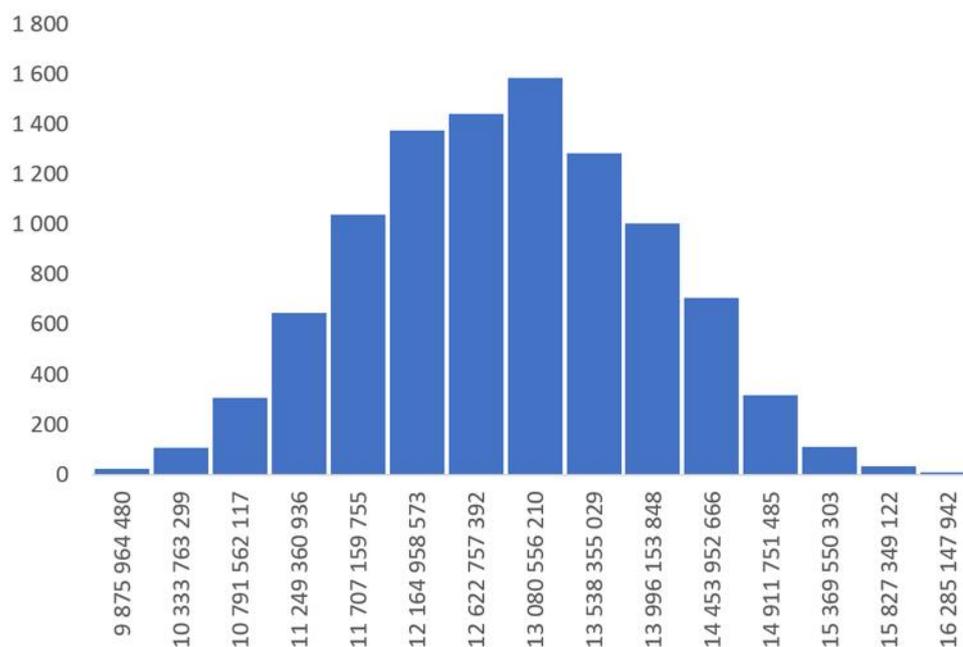
Figure Annexe 18.3-7 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident

18.3.4 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec prise en compte du risque d'accident

Ce chapitre permet de visualiser les résultats de l'option 4 lorsque le risque d'accident est pris en compte, soit uniquement dans le scénario KO. La prise en compte du risque d'accident accroît considérablement le coût de l'option 4.

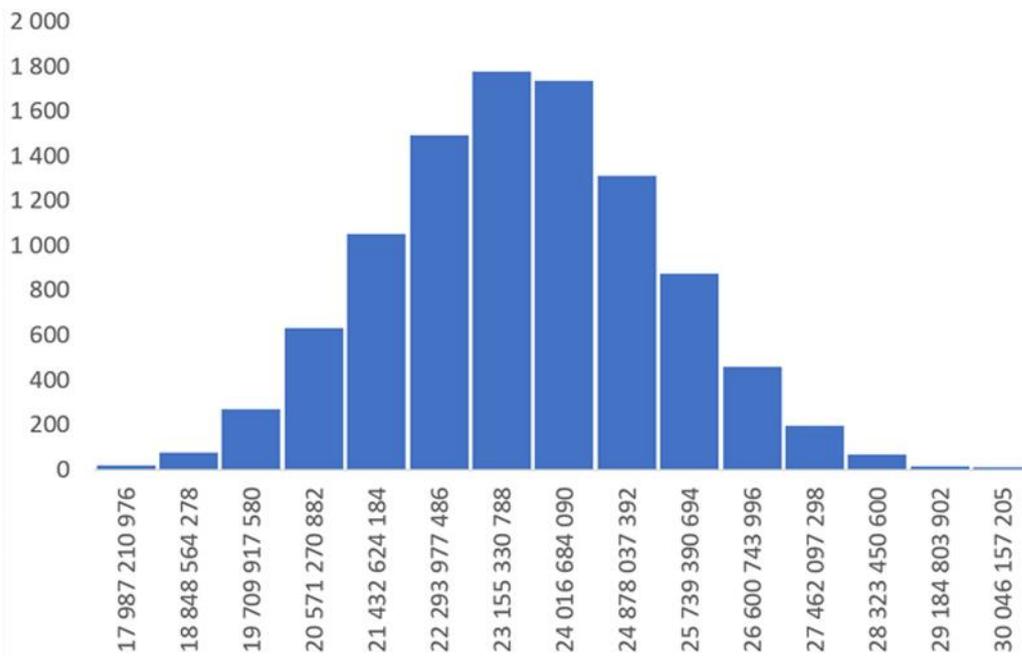
Tableau Annexe 18.3-3 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec prise en compte du risque d'accident

Option 4 Scénario KO avec accident	Moyenne	Écart-type	Min	Max	[5 % ; 95 %]
Actualisation haute	12 636 M€	1 096 M€	9 481 M€	16 285 M€	10 857 M€ ; 14 425 M€
Actualisation intermédiaire	23 006 M€	1 867 M€	17 126 M€	30 046 M€	19 941 M€ ; 26 116 M€
Actualisation basse	43 825 M€	4 836 M€	30 364 M€	67 640 M€	36 535 M€ ; 52 360 M€



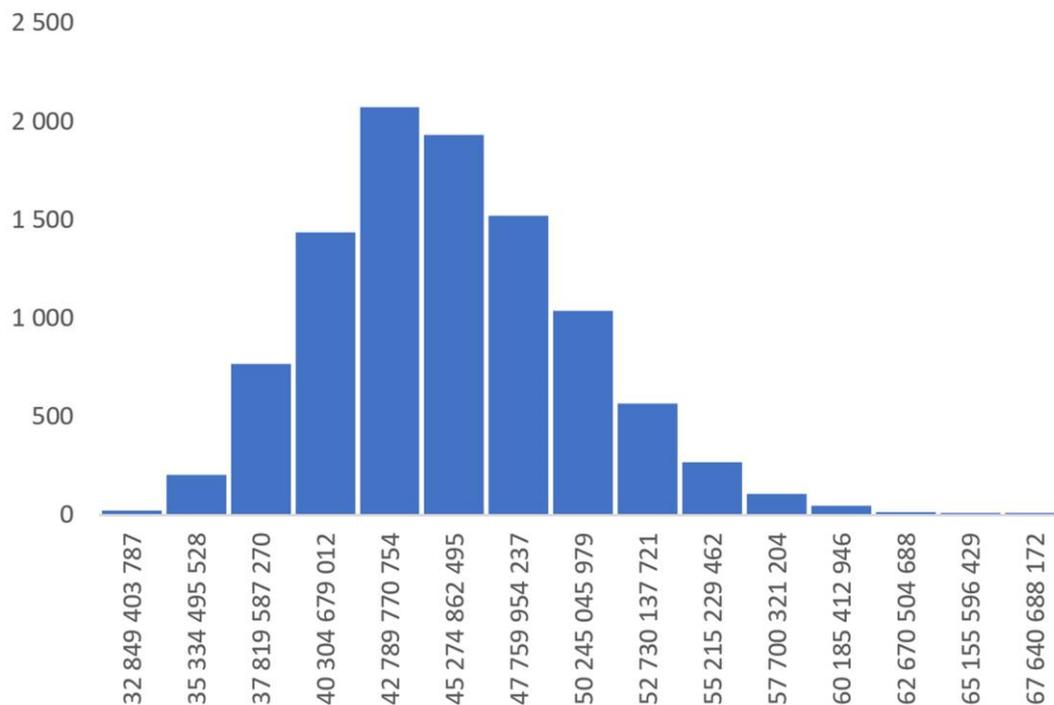
CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0135-B

Figure Annexe 18.3-8 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0049-A

Figure Annexe 18.3-9 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident



CG-00-D-MGE-AMOA-EEE-0000-19-0136-B

Figure Annexe 18.3-10 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident

18.4 Prise en compte de la valeur d'option au sein de l'option 4

18.4.1 Construction du modèle et critère de décision sans valeur d'option

Le calcul des coûts actualisés des options de projet s'est jusqu'à présent fondé sur une approche en aléatoire (c'est-à-dire avec la mise en œuvre de tirages Monte-Carlo), mais sans valeur d'option.

Pour ce faire, un certain nombre de coûts unitaires (coût de mise en place de Cigéo, coût de R&D, coût de recherche de site, coût d'une technologie prospective, coût d'entreposage, coût de transport, coût de maintien de site, etc.) ont été définis. Ces coûts unitaires, déterministes, représentent la « meilleure estimation » que l'on puisse faire aujourd'hui de chacun de ces types de coûts.

Ces coûts unitaires ne pouvant être qu'une estimation, une fourchette de risque encadrant ces coûts unitaires ont été définis. Pour rappel, les fourchettes retenues sont de 80 % à 150 % du coût brut pour l'ensemble de ces coûts unitaires précités.

Des tirages Monte-Carlo (au nombre de 10 000) ont ensuite été effectués sur les coûts de chaque branche.

Chaque tirage effectué représente un « état du monde » possible. Par exemple, le tableau ci-dessous liste la valeur prise par chaque paramètre pour trois tirages. Ainsi, le premier tirage représente un état du monde au sein duquel les coûts de transport, de GIP et de maintien de site sont relativement supérieurs à notre meilleure estimation actuelle (>100 %), alors que les coûts d'entreposage, de maintien des compétences, de R&D et de recherche de site sont relativement inférieurs (<100 %). Le second tirage représente un état du monde au sein duquel l'ensemble des coûts sont relativement supérieurs à notre meilleure estimation actuelle ; dans le troisième tirage, l'ensemble des coûts, à l'exception des coûts de mise en place de Cigéo et de maintien des compétences, sont inférieurs.

Tableau Annexe 18.4-1 Exemples de valeurs de tirages

Tirage n°	Coûts unitaires							
	Mise en place de Cigéo	R&D	Recherche de site	Entreposage	Transport	GIP	Maintien de compétences	Maintien du site
1	105 %	99 %	87 %	81 %	130 %	148 %	77 %	130 %
2	140 %	133 %	140 %	123 %	136 %	121 %	113 %	144 %
3	112 %	85 %	97 %	89 %	76 %	88 %	112 %	97 %

Le critère de choix est alors le suivant : à chaque nœud de décision, le décideur choisi la branche disponible dont la valeur moyenne est la plus faible. On note les possibilités comme suit :

1. Mettre en place Cigéo pour les déchets HA et MA-VL, en 2070, dont le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \bar{c}_1 ;
2. Mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets HA et mettre en œuvre une technologie prospective pour les déchets MA-VL, en 2070, dont le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \bar{c}_2 ;
3. Mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets MA-VL et mettre en œuvre une technologie prospective pour les déchets HA, en 2070, dont le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \bar{c}_3 ;
4. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA MA-VL, en 2070, dont le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \bar{c}_4 ;

5. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA en 2070, puis mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets MA-VL sur un nouveau site en 2100. Le décideur ne pourra bénéficier de cette possibilité qu'avec une probabilité p_8 (variable aléatoire distribuée uniformément entre 0,3 et 0,7, avec une moyenne de 0,5), et devra mettre en œuvre 6. avec une probabilité $1 - p_8$ sinon. Le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \overline{C}_5 ;
6. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA en 2070, puis faire de l'entreposage de longue durée renouvelé des déchets MA-VL, dont le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \overline{C}_6 ;
7. Rechercher un nouveau site pour Cigéo et mettre en œuvre Cigéo pour les déchets HA et MA-VL en 2100. Le décideur ne pourra bénéficier de cette possibilité qu'avec une probabilité p_9 (variable aléatoire distribuée uniformément entre 0,3 et 0,7, avec une moyenne de 0,5), et devra mettre en œuvre 8. avec une probabilité $1 - p_9$ sinon. Le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \overline{C}_7 ;
8. Faire de l'entreposage de longue durée renouvelé des déchets HA et MA-VL. Le coût moyen sur l'ensemble des tirages effectués est noté \overline{C}_8 ;

Ainsi, le décideur public cherchera le coût minimal moyen ($\overline{C}_1 - \overline{C}_8$) parmi les options disponibles pour chaque nœud de décision en 2070. Par exemple, la première possibilité de l'option 4 est la situation où le site de Meuse/Haute-Marne est maintenu, et la recherche est fructueuse pour les déchets HA et les déchets MA-VL. Dans cette situation, le décideur bénéficie de toutes les options de gestion de déchets possibles. Ainsi, il cherchera le coût minimal parmi $\overline{C}_1, \overline{C}_2, \overline{C}_3, \overline{C}_4, \overline{C}_6(C_5p_8 + \overline{C}_6(1 - p_8)), (\overline{C}_7p_9 + \overline{C}_8(1 - p_9)), \overline{C}_8$

18.4.2 Construction du modèle et critère de décision avec valeur d'option

En mobilisant comme critère la minimisation du coût moyen, l'espérance de l'option 4 est surestimée. En effet, en 2070, lorsque le décideur devra faire un choix entre les différentes branches, il saura dans quel état du monde il se trouve. Pour un même nœud de décision, son choix pourra ainsi différer en fonction des tirages (états du monde).

L'approche avec valeur d'option intègre dans le calcul de l'espérance (i) le gain d'information et (ii) la flexibilité dont bénéficie le décideur public. Au lieu de choisir dès aujourd'hui la branche (ou les branches pondérées) dont l'espérance moyenne est la plus faible avec les informations disponibles aujourd'hui, le choix avec valeur d'option reporte cette décision à 2070. Il laisse la flexibilité au décideur de choisir, au sein de chaque tirage (état du monde) la branche (ou les branches pondérées) qui minimisent l'espérance de coût de l'option.

Par exemple, en 2070, la première possibilité de l'option 4 est la situation où le site de Meuse/Haute-Marne est maintenu, et la recherche est fructueuse pour les déchets HA et les déchets MA-VL. Dans cette situation, le décideur bénéficie de toutes les options de gestion de déchets possibles. Celles-ci sont les suivantes :

1. Mettre en place Cigéo pour les déchets HA et MA-VL, en 2070, dont le coût pour le tirage t est noté C_{1t} ;
2. Mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets HA et mettre en œuvre une technologie prospective pour les déchets MA-VL, en 2070, dont le coût pour le tirage t est noté C_{2t} ;
3. Mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets MA-VL et mettre en œuvre une technologie prospective pour les déchets HA, en 2070, dont le coût pour le tirage t est noté C_{3t} ;
4. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA MA-VL, en 2070, dont le coût pour le tirage t est noté C_{4t} ;
5. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA en 2070, puis mettre en place Cigéo uniquement pour les déchets MA-VL sur un nouveau site en 2100. Le décideur ne pourra bénéficier de cette possibilité qu'avec une probabilité p_8 (variable aléatoire distribuée uniformément entre 0,3 et 0,7, avec une moyenne de 0,5), et devra mettre en œuvre 6. avec une probabilité $1 - p_8$ sinon. Le coût pour le tirage t est noté C_{5t} ;

6. Mettre en place une technologie prospective pour les déchets HA en 2070, puis faire de l'entreposage de longue durée renouvelé des déchets MA-VL, dont le coût pour le tirage t est noté C_{6t} ;
7. Rechercher un nouveau site pour Cigéo et mettre en œuvre Cigéo pour les déchets HA et MA-VL en 2100. Le décideur ne pourra bénéficier de cette possibilité qu'avec une probabilité p_9 (variable aléatoire distribuée uniformément entre 0,3 et 0,7, avec une moyenne de 0,5), et devra mettre en œuvre 8. avec une probabilité $1 - p_9$ sinon. Le coût pour le tirage t est noté C_{7t} ;
8. Faire de l'entreposage de longue durée renouvelé des déchets HA et MA-VL. Le coût pour le tirage t est noté C_{8t} ;

Le critère de choix du décideur sera, à chaque tirage, $\text{Min}(C_1, C_2, C_3, C_4, C_6, (C_5p_8 + C_6(1 - p_8)), (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$. En notant t chaque tirage, l'espérance de la branche avec la prise en compte de la valeur d'option est donc de $\text{MoyenneMin}(C_{1t}, C_{2t}, C_{3t}, C_{4t}, C_{6t}, (C_{5t}p_{8t} + C_{6t}(1 - p_{8t})), (C_{7t}p_{9t} + C_{8t}(1 - p_{9t})), C_{8t})$.

Le tableau ci-dessous récapitule le choix du décideur public à chaque tirage pour chaque nœud de décision en 2070 :

Tableau Annexe 18.4-2 Règle de décision à chaque nœud de décision avec valeur d'option

Situation en 2070	Choix à chaque tirage
Branche 4.1 : R&D fructueuse pour les HA et MA-VL Site de Meuse/Haute-Marne conservé	$\text{Min}(C_1, C_2, C_3, C_4, C_6, (C_5p_8 + C_6(1 - p_8)), (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.1</i>
Branche 4.2 : R&D fructueuse pour les HA et MA-VL Site de Meuse/Haute-Marne perdu	$\text{Min}(C_4, C_6, (C_5p_8 + C_6(1 - p_8)), (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.2</i>
Branche 4.3 : R&D fructueuse pour les HA uniquement Site de Meuse/Haute-Marne conservé	$\text{Min}(C_1, C_3, C_6, (C_5p_8 + C_6(1 - p_8)), (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.3</i>
Branches 4.4 et 4.5 : R&D fructueuse pour les HA uniquement Site de Meuse/Haute-Marne perdu	$\text{Min}(C_6, (C_5p_8 + C_6(1 - p_8)), (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.4</i>
Branche 4.6 : R&D pas fructueuse Site de Meuse/Haute-Marne conservé	$\text{Min}(C_1, (C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.6</i>
Branches 4.7 et 4.8 : R&D pas fructueuse Site de Meuse/Haute-Marne perdu	$\text{Min}((C_7p_9 + C_8(1 - p_9)), C_8)$, que l'on nomme <i>Min4.7</i>

Il convient ensuite de multiplier chaque résultat obtenu à chaque tirage (le coût de la branche minimale obtenue à chaque nœud de décision) par leur probabilité d'occurrence, qui sont également variables en fonction des tirages. Ces probabilités d'occurrence dépendent de la valeur prise par la probabilité de maintien de site, d'identification d'un nouveau site et d'aboutissement de la R&D. Pour rappel, ces valeurs sont comprises entre 0,3 et 0,7, et distribuées de façon uniforme.

Tableau Annexe 18.4-3 Probabilité à chaque nœud de décision

Branche de l'option 4	Probabilité	Valeur moyenne
Branche 4.1 : R&D fructueuse pour les HA et MA-VL Site de Meuse/Haute-Marne conservé	p_1	0,225
Branche 4.2 : R&D fructueuse pour les HA et MA-VL Site de Meuse/Haute-Marne perdu	p_2	0,25
Branche 4.3 : R&D fructueuse pour les HA uniquement Site de Meuse/Haute-Marne conservé	p_3	0,025
Branches 4.4 et 4.5 : R&D fructueuse pour les HA uniquement Site de Meuse/Haute-Marne perdu	p_4	0,025
Branche 4.6 : R&D pas fructueuse Site de Meuse/Haute-Marne conservé	p_6	0,25
Branches 4.7 et 4.8 : R&D pas fructueuse Site de Meuse/Haute-Marne perdu	p_7	0,25
Total		1

L'espérance a chaque tirage est alors égal a :

$$p_1 \text{Min}4.1_t + p_2 \text{Min}4.2_t + p_3 \text{Min}4.3_t + p_4 \text{Min}4.4_t + p_6 \text{Min}4.6_t + p_7 \text{Min}4.7_t$$

L'espérance de l'option 4 avec la prise en compte de la valeur d'option est ensuite simplement égal a la moyenne de l'espérance a chaque tirage, pour les 10 000 tirages effectués.

18.4.3 Résultats en scénario OK

Tableau Annexe 18.4-4 Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK, avec valeur d'option

Option 4 Scénario OK	Moyenne Sans valeur d'option	Moyenne avec valeur d'option	Écart-type avec valeur d'option	Min avec valeur d'option	Max avec valeur d'option	[5 % ; 95 %] avec valeur d'option
Actualisation haute	9 019 M€	9 018 M€	809 M€	6 792 M€	11 348 M€	7 716 M€ ; 10 328 M€
Actualisation intermédiaire	12 096 M€	12 096 M€	1 026 M€	9 098 M€	14 947 M€	10 434 M€ ; 13 752 M€
Actualisation basse	17 133 M€	16 786 M€	1 293 M€	13 046 M€	21 249 M€	14 677 M€ ; 18 963 M€

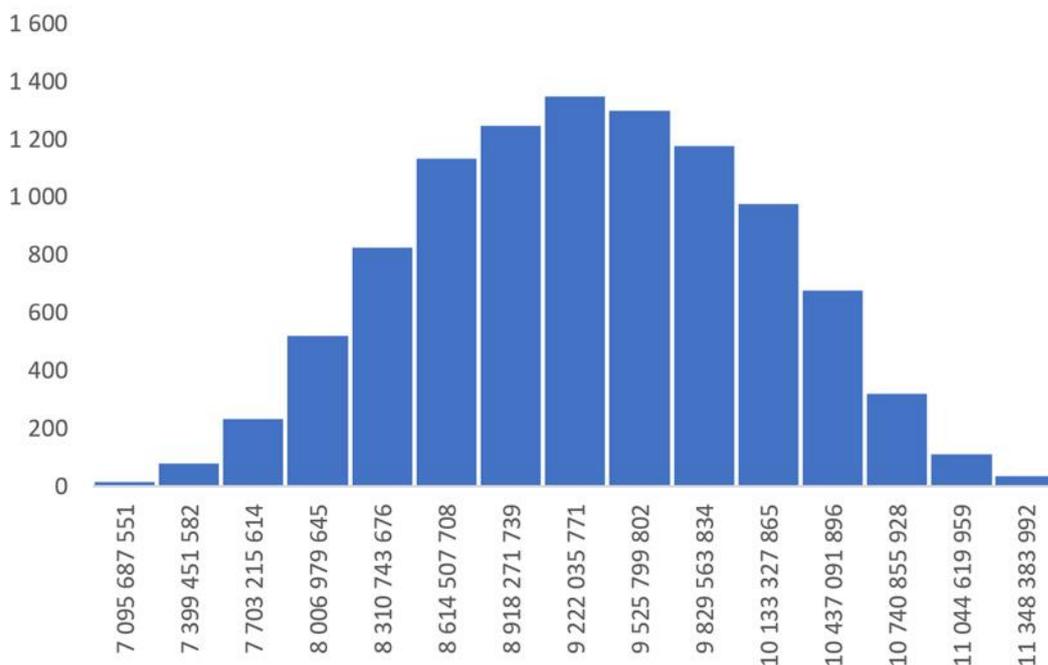


Figure Annexe 18.4-1 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne haute, dans le scénario OK avec valeur d'option

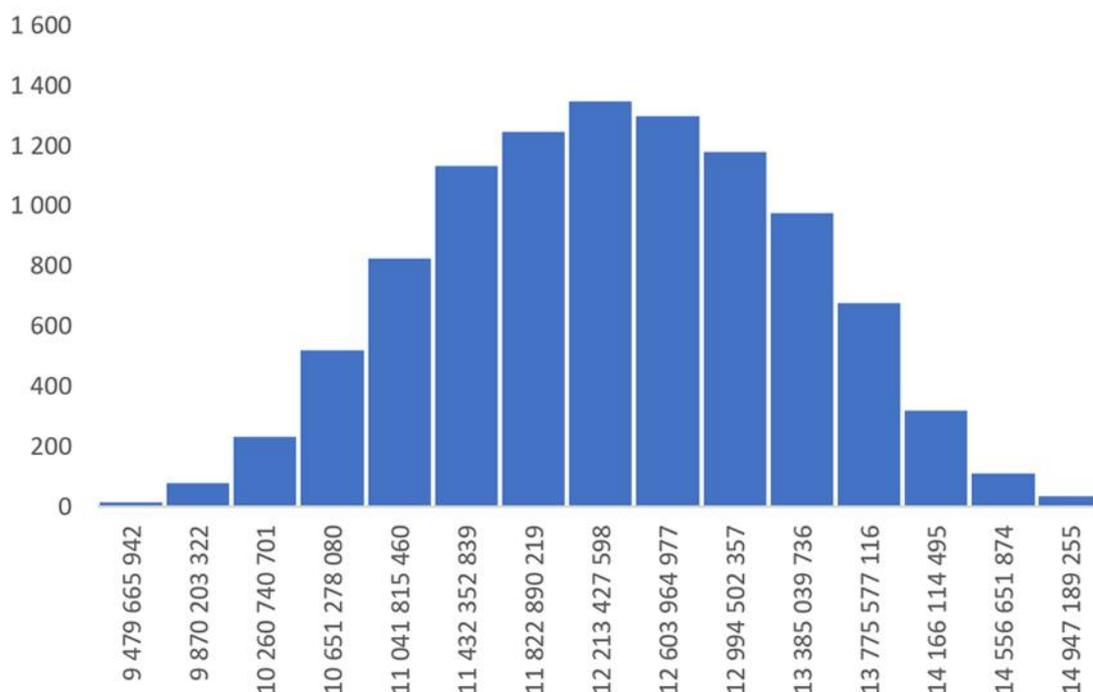
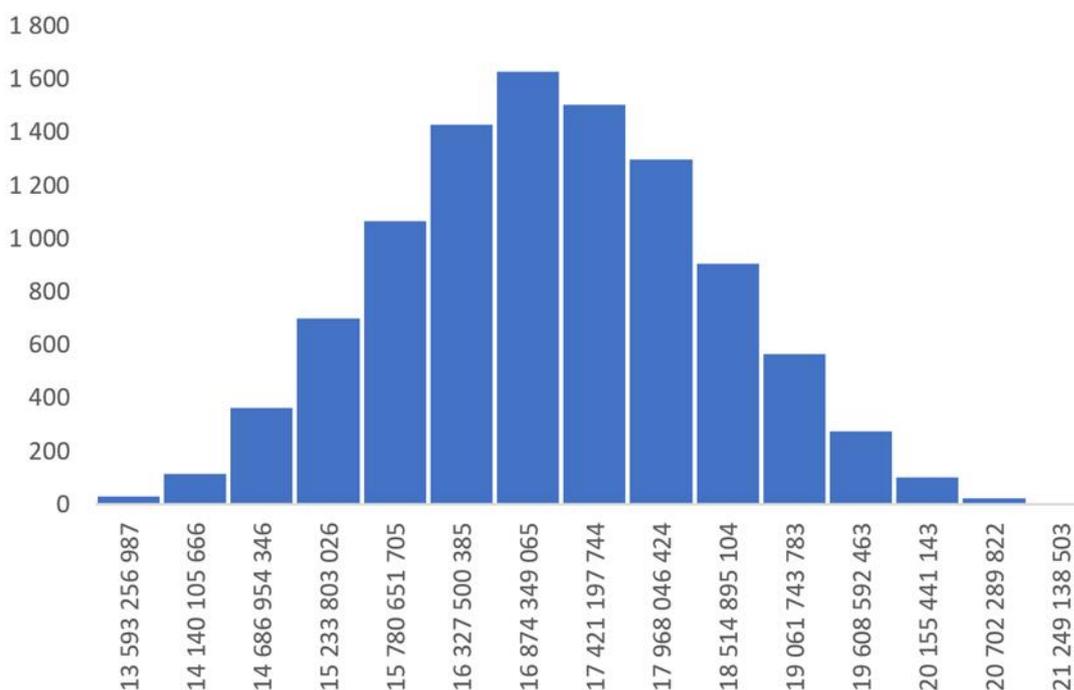


Figure Annexe 18.4-2 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne intermédiaire, dans le scénario OK avec valeur d'option



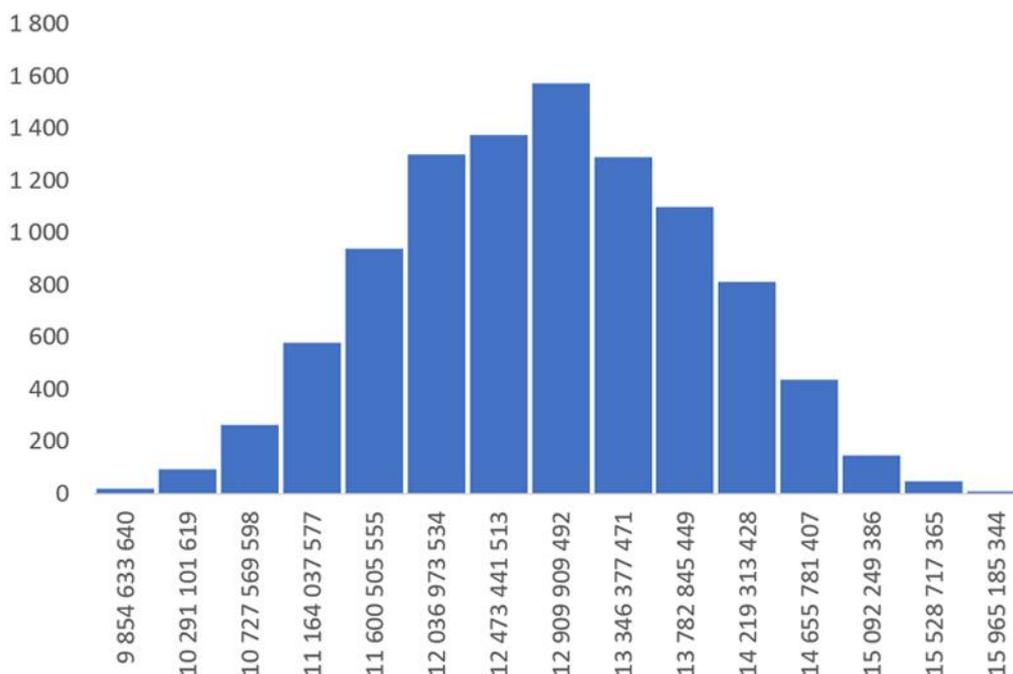
CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0055-A

Figure Annexe 18.4-3 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne basse, dans le scénario OK avec valeur d'option

18.4.4 Résultats en scénario KO

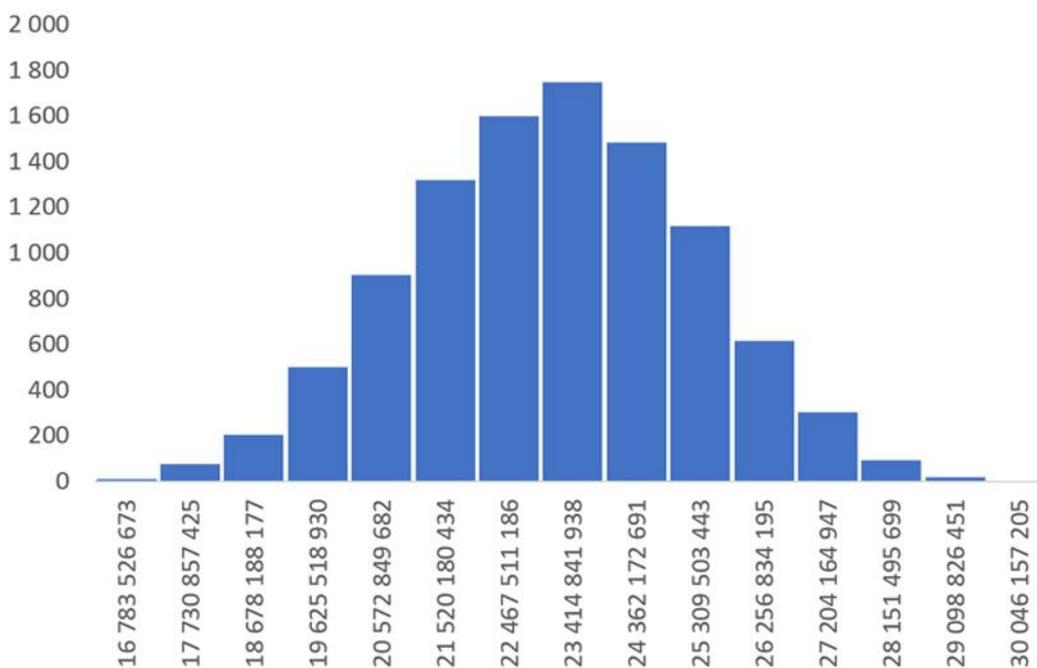
Tableau Annexe 18.4-5 Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec valeur d'option

Option 4 Scénario KO avec accident	Moyenne Sans valeur d'option	Moyenne avec valeur d'option	Écart-type avec valeur d'option	Min avec valeur d'option	Max avec valeur d'option	[5 % ; 95 %] avec valeur d'option
Actualisation haute	12 636 M€	12 589 M€	1 071 M€	9 481 M€	16 285 M€	10 849 M€ ; 14 331 M€
Actualisation intermédiaire	23 006 M€	22 642 M€	2 096 M€	15 836 M€	30 046 M€	19 177 M€ ; 26 087 M€
Actualisation basse	43 825 M€	43 047 M€	5 228 M€	28 594 M€	67 640 M€	36 180 M€ ; 52 304 M€



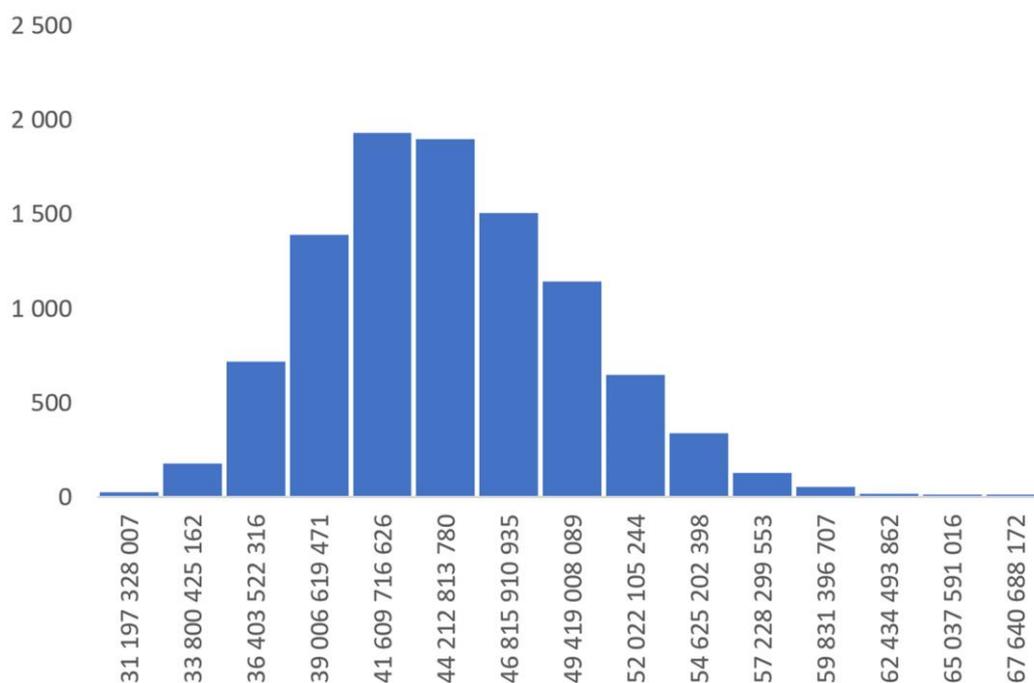
CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0051-A

Figure Annexe 18.4-4 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0052-A

Figure Annexe 18.4-5 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option



CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0050-A

Figure Annexe 18.4-6 Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option

Annexe 19 Détail des coûts et représentation graphique des variantes de l'option de projet 1

Les variantes de l'option de projet 1 consistent au décalage de 10 ans (variante à 2029) ou de 20 ans (variante à 2039) de l'option de projet 1 (considérée dès 2019).

19.1 Coûts unitaires des variantes de l'option de projet 1

19.1.1 Coût de mise en place de Cigéo

Concernant les coûts relatifs à la mise en place du stockage géologique profond dans le centre de stockage Cigéo, nous mobilisons pour les variantes : décalage de 10 ans et décalage de 20 ans, un coût identique à celui mobilisé pour l'option de projet 1, soit 25 811 millions d'euros.

Notons que, au sein de ces variantes, la durée de fonctionnement de Cigéo est réduite, du fait de la concomitance des périodes de stockage entre les déchets MA-VL et HA. En effet dans les variantes, le décalage de la période de stockage des déchets MA-VL, plus courte, vient s'intercaler en parallèle de la période de stockage des déchets HA, plus longue et demeurant inchangée dans les variantes relativement à ce qui est observé dans l'option de projet 1. Ainsi :

- en option de projet 1, les MA-VL sont stockés entre 2040 et 2100, et les HA entre 2080 et 2145 ; la durée de fonctionnement totale est ainsi de 105 ans ;
- dans la variante à 2029, avec un décalage de 10 ans, les MA-VL sont stockés entre 2050 et 2110, et les HA entre 2080 et 2145 ; la durée de fonctionnement totale est ainsi de 95 ans ;
- dans la variante à 2039, avec un décalage de 20 ans, les MA-VL sont stockés entre 2060 et 2120, et les HA entre 2080 et 2145 ; la durée de fonctionnement totale est ainsi de 85 ans.

Cette réduction de la durée de fonctionnement pourrait réduire certaines catégories de coûts, et notamment celles liées à la fiscalité. Afin de prendre en compte cette économie potentielle, un ajustement de coût a été effectué pour les branches de l'option 4 où Cigéo est mis en place en 2070 ou 2100. Le coût a alors été estimé à 25 518 millions d'euros, soit une économie très marginale pour une durée de fonctionnement réduite à 65 ans. Ainsi, nous choisissons de ne pas modéliser de réduction de coût pour les décalages de mise en œuvre de Cigéo de 10 et 20 ans.

Nous supposons toutefois, dans la modélisation des autres coûts afférents à cette variante et liés à la date de commencement de stockage des HA (transport et entreposage), afin de ne pas alourdir cette variante de coûts d'entreposage et ainsi commettre de biais d'optimisme en faveur de Cigéo, que le début de stockage des HA commence, quel que soit la variante (+10 ans ou +20 ans) en 2080, et non en 2090 (décalage de 10 ans) ou 2100 (décalage de 20 ans). La date de 2080 respecte la période de 60 ans de décroissance thermique des déchets HA, nécessaire en amont de leur stockage.

19.1.2 Coût de GIP

Nous posons l'hypothèse d'un prolongement des GIP jusqu'à la décision de mise en place de Cigéo, soit :

- 2029 pour un décalage de 10 ans ; cela correspond à un coût total 510 millions d'euros ;
- 2039 pour un décalage de 20 ans ; cela correspond à un coût total de 810 millions d'euros.

19.1.3 Coût de transport

Les coûts de transport de déchets sont identiques à ceux mobilisés pour l'ensemble des autres options, soit 231 millions d'euros pour les déchets HA et 1 241 millions d'euros pour les déchets MA-VL.

19.1.4 Coût de maintien du site

Comme pour l'option 4, nous posons l'hypothèse d'un coût de maintien du site à hauteur de 32,4 millions d'euros par an. Ces dépenses sont effectuées jusqu'à la décision de mise en place de Cigéo, soit :

- 2029 pour un décalage de 10 ans ; cela correspond à un coût total 324 millions d'euros ;
- 2039 pour un décalage de 20 ans ; cela correspond à un coût total de 648 millions d'euros.

19.1.5 Coût de maintien des compétences

Comme pour l'option 4, nous posons l'hypothèse d'un coût de maintien des compétences à hauteur de 24 millions d'euros par an. Ces dépenses sont effectuées jusqu'à la décision de mise en place de Cigéo, soit :

- 2029 pour un décalage de 10 ans ; cela correspond à un coût total 240 millions d'euros ;
- 2039 pour un décalage de 20 ans ; cela correspond à un coût total de 480 millions d'euros.

19.1.6 Coût d'entreposage

Pour un décalage de 10 ans comme pour un décalage de 20 ans, des surcoûts d'entreposage ne sont considérés que pour déchets MA-VL. En effet, les déchets HA peuvent être stockés, comme pour l'option de projet 1, dès 2080 dans ces deux cas de figure.

Les surcoûts d'entreposage, issus de données fournies pour les producteurs, sont les suivants :

- pour un décalage de 10 ans, un surcoût de 608 millions d'euros ;
- pour un décalage de 20 ans, un surcoût de 1 512 millions d'euros.

19.2 Coût brut des variantes de l'option de projet 1

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes composantes du coût brut de l'option de projet 1, et de ses variantes : décalage de 10 ans et de 20 ans.

Tableau Annexe 19.2-1 Coût brut de l'option de projet 1 et de ses variantes : décalage de 10 ans et de 20 ans

Coût unitaire	Option de projet 1	Variante : décalage de 10 ans	Variante : décalage de 20 ans
Coût de mise en place de Cigéo	25 811 M€	25 811 M€	25 811 M€
Coût des GIP	420 M€	510 M€	810 M€
Coût de transport	1 472 M€	1 472 M€	1 472 M€
Coût de maintien du site	0 €	324 M€	648 M€
Coût de maintien des compétences	0 €	240 M€	480 M€
Coût d'entreposage	0 €	608 M€	1 511 M €
Coût brut total	27 703 M€	28 965 M€	30 732 M€

19.3 Représentation graphique des variantes de l'option de projet 1

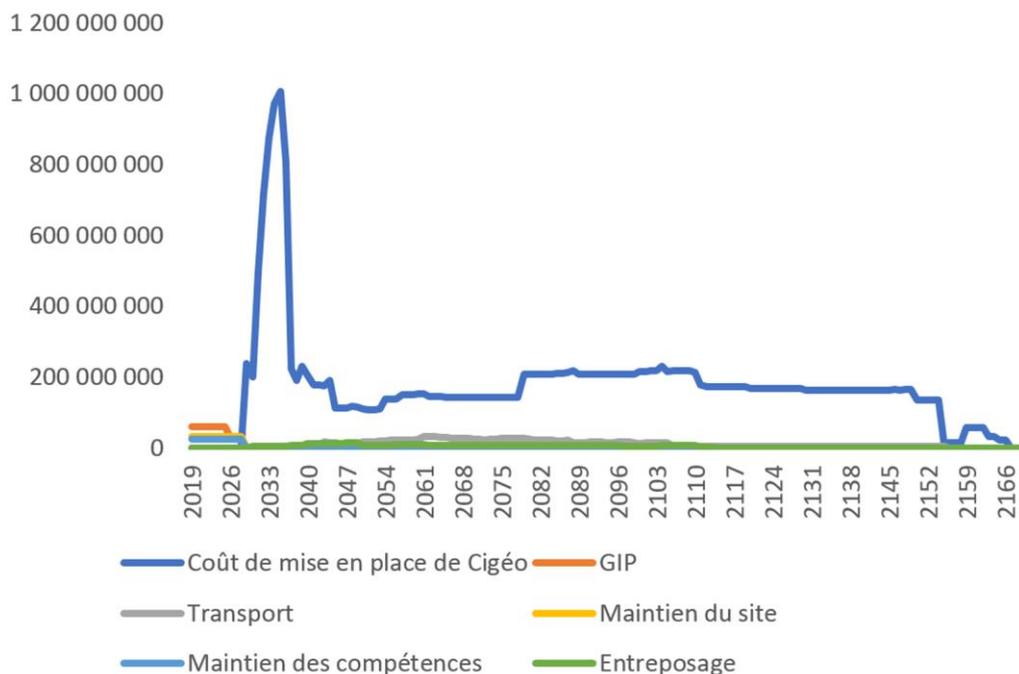


Figure Annexe 19.3-1 Chronique de coûts pour un décalage de 10 ans de l'option de projet 1

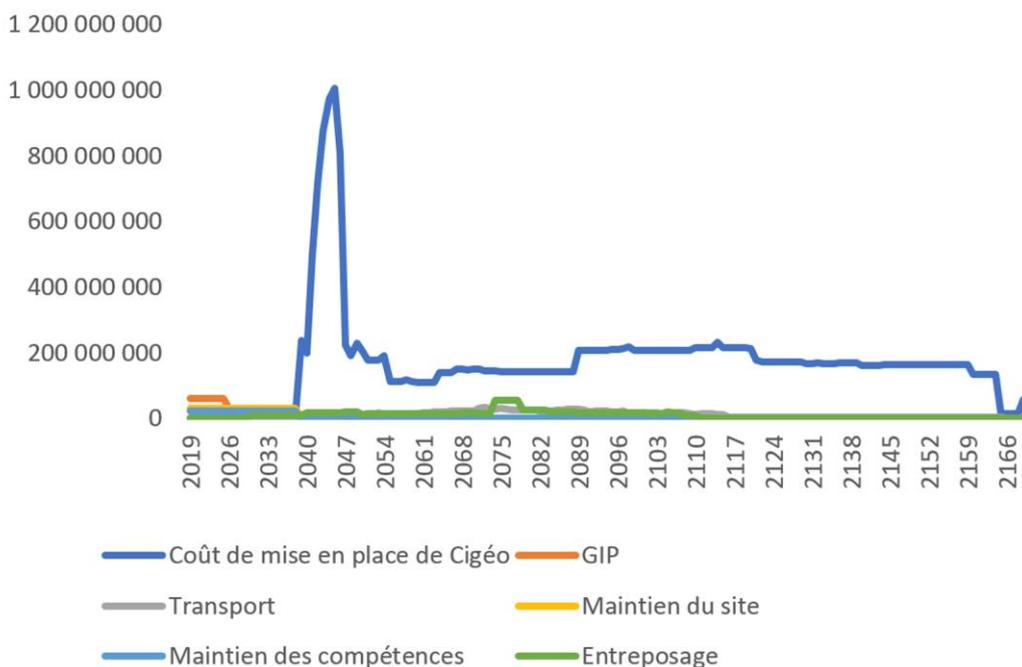


Figure Annexe 19.3-2 Chronique de coûts pour un décalage de 20 ans de l'option de projet 1

Annexe 20 Détail du calcul du bénéfice assurantiel

Calculs de bénéfice assurantiel (valeurs en milliards EUR 2019)

Valeurs	Option 1		Variante Option 4	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	14,5	22,8	8,4	58,3
Taux act inter	12,5	16,7	4,0	14,2
Taux act haut	9,8	11,6	2,3	4,5
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	6,0	1,9	-4,3	-35,5
Taux act inter	8,5	7,9	7,0	2,5
Taux act haut	7,5	7,5	7,4	7,2

Valeurs	Option 4.1.d et 4.2		ELD en 2070	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	23,1	52,5	16,7	69,0
Taux act inter	17,2	30,8	11,6	23,7
Taux act haut	11,0	16,3	8,8	12,2
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	6,4	4,1	0,7	-16,5
Taux act inter	5,5	5,7	5,9	7,1
Taux act haut	2,2	2,4	2,7	4,1

Valeurs	Option 4.1.a, 4.3.a, 4.6		ELD en 2070	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	17,4	33,1	16,7	69,0
Taux act inter	14,0	21,8	11,6	23,7
Taux act haut	10,0	13,3	8,8	12,2
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	0,7	-3,0	-8,5	-36,0
Taux act inter	2,4	2,0	1,3	-1,8
Taux act haut	1,2	1,2	1,2	1,2

Valeurs	Option 4.4		Option 4.5	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	19,4	46,5	20,7	79,6
Taux act inter	15,0	27,5	14,6	30,2
Taux act haut	10,4	15,3	10,2	15,1
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	-1,3	-4,5	-9,2	-33,1
Taux act inter	0,4	0,1	-0,4	-2,7
Taux act haut	0,1	0,1	0,1	0,2

Valeurs	Option 4.1.b		ELD en 2070	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	25,1	56,6	16,7	69,0
Taux act inter	18,9	33,4	11,6	23,7
Taux act haut	11,8	17,5	8,8	12,2
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	8,4	6,3	3,2	-12,4
Taux act inter	7,3	7,5	7,9	9,7
Taux act haut	3,0	3,3	3,6	5,4

Valeurs	Option 4.7		Option 4.8	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	17,0	42,1	17,2	70,3
Taux act inter	13,0	23,8	12,1	24,6
Taux act haut	9,3	13,2	9,0	12,6
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	-0,2	-3,0	-7,2	-28,2
Taux act inter	0,9	0,7	0,5	-0,8
Taux act haut	0,3	0,3	0,3	0,6

Valeurs	Option 4.1.c et 4.3.b		ELD en 2070	
	OK	KO	OK	KO
Taux act bas	19,3	37,5	16,7	69,0
Taux act inter	15,6	24,9	11,6	23,7
Taux act haut	10,8	14,9	8,8	12,2
	p(KO)			
Bénéfice	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	2,7	-0,7	-5,9	-31,5
Taux act inter	3,9	3,7	3,3	1,2
Taux act haut	2,1	2,1	2,2	2,8

Coût de l'ELD en 2070	OK			KO		
	2019-2070	2070-2600	Total	2019-2070	2070-2600	Total
Taux act bas	10,1	6,5	16,7	13,3	55,8	69,0
Taux act inter	9,4	2,3	11,6	11,6	12,1	23,7
Taux act haut	7,9	0,9	8,8	9,4	2,8	12,2

Proba branches	
Branche 4.1	0,23
Branche 4.2	0,23
Branche 4.3	0,03
Branche 4.4	0,01
Branche 4.5	0,01
Branche 4.6	0,25
Branche 4.7	0,13
Branche 4.8	0,13

Bénéfice Option 4.1		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	0,7	-3,0	-8,5	-36,0
Taux act inter	2,4	2,0	1,3	-1,8
Taux act haut	1,2	1,2	1,2	1,2

correspondant au minimum des branches 4.1.a à 4.1.d

Bénéfice Option 4.3		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	0,7	-3,0	-8,5	-36,0
Taux act inter	2,4	2,0	1,3	-1,8
Taux act haut	1,2	1,2	1,2	1,2

correspondant au minimum des branches 4.3.a à 4.3.b

Bénéfice max Option 4		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	6,4	4,1	0,7	-16,5
Taux act inter	5,5	5,7	5,9	7,1
Taux act haut	2,2	2,4	2,7	4,1

bénéfice maximum des branches 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.6 et 4.7

Coûts option 1		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	14,5	15,3	16,6	22,8
Taux act inter	12,5	13,0	13,6	16,7
Taux act haut	9,8	10,0	10,3	11,6

Coûts option 4 avec bénéfices		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	18,6	20,8	24,0	40,0
Taux act inter	14,5	15,5	17,0	24,5
Taux act haut	10,0	10,4	11,0	14,0

coûts espérés en allouant aux branches 4.5 et 4.8 les bénéfices des branches 4.4 et 4.7

Ecart option 1 - option 4		p(KO)		
	0	0,1	0,25	1
Taux act bas	-4,2	-5,5	-7,4	-17,2
Taux act inter	-2,0	-2,6	-3,4	-7,7
Taux act haut	-0,2	-0,4	-0,7	-2,4

CG-TE-D-MGE-AMOA-EEE-0000-20-0063-A

Figure Annexe 19.3-1 Calcul du bénéfice assurantiel

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1.1-1	Le principe de l'évaluation socioéconomique	26
Figure 1.4-1	Contextualisation des échelles de temps de l'évaluation socioéconomique	31
Figure 1.4-2	Simulation de valeurs actualisées, en fonction du choix de taux d'actualisation	32
Figure 2.4-1	Historique du centre de stockage Cigéo et prochaines étapes (source Andra)	45
Figure 2.4-2	Les grandes phases du projet global Cigéo	46
Figure 2.4-3	Calendrier illustratif de l'option de projet 1 : le centre de stockage Cigéo tel que prévu par l'Andra	47
Figure 3.2-1	Projection de l'évolution annuelle du PIB/tête en € ₂₀₁₉ , de 2019 à 2060, selon les données COR et INSEE	57
Figure 3.2-2	Projection du taux de croissance de PIB/tête en € ₂₀₁₉ , de 2019 à 2600, données COR et calculs des auteurs	58
Figure 3.2-3	Historique du niveau de PIB/tête en France en € ₂₀₁₉ , de 1700 à 2019, données Maddison project database (41) et calculs des auteurs	59
Figure 3.2-4	Taux de croissance du PIB/tête du scénario KO de 2019 à 2100 selon les données « Shared socioeconomic pathways » (SSP3)	61
Figure 3.2-5	Taux de croissance du PIB/tête du scénario KO de 2019 à 2600, selon les données « Shared socioeconomic pathways » (SSP3) et calculs des auteurs	62
Figure 3.2-6	Récapitulatif du niveau de PIB/tête en France en € ₂₀₁₉ , de 1280 à 2019, selon les données Maddison project database (41), et projection jusqu'en 2600, selon les calculs des auteurs	63
Figure 3.3-1	Courbe du taux de préférence pour le présent	71
Figure 3.3-2	Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK	74
Figure 3.3-3	Borne intermédiaire des taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK	75
Figure 3.3-4	Borne basse des taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario OK	75
Figure 3.3-5	Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK	76
Figure 3.3-6	Borne intermédiaire des taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK	76
Figure 3.3-7	Borne basse des taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario OK	77
Figure 3.3-8	Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO	80
Figure 3.3-9	Borne intermédiaire du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO	80
Figure 3.3-10	Borne basse du taux d'actualisation pour les flux liés au génie civil en scénario KO	81
Figure 3.3-11	Borne haute du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO	81

Figure 3.3-12	Borne intermédiaire du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO	82
Figure 3.3-13	Borne basse du taux d'actualisation pour les flux liés à la recherche et au maintien des compétences en scénario KO	82
Figure 3.4-1	Exemple - Nœud de décision déterministe	85
Figure 3.4-2	Exemple - Nœud de décision avec valeur d'option	87
Figure 3.4-3	Exemple - Valeur des tirages avec et sans valeur d'option	88
Figure 4.3-1	Calendrier illustratif de l'option de projet 1	97
Figure 4.4-1	Arbre de décision pour l'option 2	98
Figure 4.4-2	Calendrier illustratif de la branche 2.1.b	99
Figure 4.5-1	Arbre de décision pour l'option 3	100
Figure 4.5-2	Calendrier illustratif de la branche 3.1.a	102
Figure 4.5-3	Calendrier illustratif de mise en place de Cigéo en option de projet 1 et en option 3, selon les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	103
Figure 4.6-1	Arbre de décision pour l'option 4	105
Figure 5.1-1	Historique des éléments constitutifs de la recherche et la sécurisation du site de Meuse/Haute-Marne	120
Figure 5.1-2	Historique et projection des coûts de recherche de site pour le site de Meuse/Haute-Marne	123
Figure 5.1-3	Exemple d'installation d'entreposage de déchets HA de type puits : hall d'entreposage de l'atelier de vitrification R7 UP2 800 du site Orano de La Hague © Orano	134
Figure 5.1-4	Exemple d'installation d'entreposage de déchets MA-VL : installation STE3 (photo prise à travers un hublot de protection) du site Orano de La Hague © Orano	134
Figure 5.2-1	La répartition des coûts afférents à Cigéo	143
Figure 5.2-2	Chronique du coût de mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1, par composante	143
Figure 5.2-3	Chronique de transport des déchets pour l'option de projet 1 - en m ³ de colis	144
Figure 5.2-4	Chronique du coût brut de l'option de projet 1	144
Figure 5.2-5	Coût de l'option de projet 1 en scénario OK	146
Figure 5.2-6	Coût de l'option de projet 1 en scénario KO	146
Figure 5.2-7	Coût actualisé de l'option de projet 1 et ses variantes (démarrage en 2029 ou 2039), selon le scénario et le taux d'actualisation	148
Figure 5.3-1	Chronique des coûts pour les trois branches de l'option 2	150
Figure 5.3-2	Chronique des coûts pour les branches 2.1.a et 2.2 de l'option 2	151
Figure 5.3-3	Chronique des coûts pour la branches 2.1.b de l'option 2	151
Figure 5.3-4	Coût des différentes branches de l'option 2	152
Figure 5.3-5	Résultats des branches de l'option 2, pour la borne haute, basse et intermédiaire du taux d'actualisation, scénario OK	154
Figure 5.3-6	Résultats des branches de l'option 2, pour la borne haute, basse et intermédiaire du taux d'actualisation, scénario KO	154
Figure 5.4-1	Chronique du coût brut des 6 branches de l'option 3, regroupées en 3 branches distinctes, en € ₂₀₁₉	158
Figure 5.4-2	Chronique du coût brut de la branche 3.1.a de l'option 3, en € ₂₀₁₉	158
Figure 5.4-3	Chronique du coût brut des branches 3.1.c et 3.2.a de l'option 3, en € ₂₀₁₉	159
Figure 5.4-4	Chronique du coût brut des branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 de l'option 3, en € ₂₀₁₉	159
Figure 5.4-5	Résultats des branches de l'option 3, pour les bornes haute, intermédiaire et basse du taux d'actualisation, scénario OK	161
Figure 5.4-6	Résultats des branches de l'option 3, pour les bornes haute, intermédiaire et basse du taux d'actualisation, scénario KO	162
Figure 5.5-1	Chronique du coût brut de l'ensemble des branches de l'option 3, jusqu'en 2110, regroupés par branche distincte, en € ₂₀₁₉	166

Figure 5.5-2	Chronique du coût des branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6, par type de coût	166
Figure 5.5-3	Chronique du coût de la branche 4.1.b, par type de coût	167
Figure 5.5-4	Chronique du coût des branches 4.1.c et 4.3.b, par type de coûts	167
Figure 5.5-5	Chronique du coût des branches 4.1.d et 4.2, par type de coûts	168
Figure 5.5-6	Chronique du coût de la branche 4.4, par type de coûts	168
Figure 5.5-7	Chronique du coût de la branche 4.5 par type de coût, jusqu'à 2165	169
Figure 5.5-8	Chronique du coût de la branche 4.5 par type de coût, jusqu'en 2600	169
Figure 5.5-9	Chronique du coût de la branche 4.7 par type de coût	170
Figure 5.5-10	Chronique du coût de la branche 4.8 par type de coût, jusqu'en 2165	170
Figure 5.5-11	Chronique du coût de la branche 4.8 par type de coût, jusqu'en 2600	171
Figure 5.5-12	Coût actualisé des branches de l'option 4, taux d'actualisation haut, intermédiaire et bas, scénario OK	172
Figure 5.5-13	Coût actualisé des branches de l'option 4, taux d'actualisation haut, intermédiaire et bas, scénario KO	175
Figure 5.5-14	Probabilité des branches de l'option 4	176
Figure 6.4-1	Zonage d'évacuation et de décontamination, suite à l'accident nucléaire de Fukushima	193
Figure 6.4-2	Représentation des aires des zones P1, P2 et P3, de celles de l'IRSN, de celles la préfecture de Fukushima et des zones SDA et ICSA spécifiées d'après l'accident de Fukushima	197
Figure 6.4-3	Localisation des principaux sites d'entreposage des déchets de haute et de moyenne activité à vie longue en France	198
Figure 6.6-1	Coût actualisé de la branche 4.5, avec et sans prise en compte du risque d'accident, taux intermédiaire	211
Figure 6.6-2	Coût actualisé de la branche 4.8, avec et sans prise en compte du risque d'accident, taux intermédiaire	212
Figure 6.6-3	Zoom sur les branches 4.4, 4.5, 4.7, 4.8 modifiées par la prise en compte d'un accident, en scénario KO	213
Figure 6.6-4	Option 4 avec prise en compte des coûts d'un accident en scénario KO, représentation uniquement des branches optimales à chaque nœud de chance	214
Figure Annexe 15.2-1	Coût de l'option de projet 1, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK	299
Figure Annexe 15.2-2	Coût de l'option de projet 1, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO	299
Figure Annexe 15.2-3	Distribution du coût de l'option de projet 1 (Cigéo) en tenant compte des prix relatifs, issue d'une simulation de Monte-Carlo, dans le scénario OK et avant actualisation, en taux intermédiaire	300
Figure Annexe 15.2-4	Distribution du coût de l'option de projet 1 (Cigéo) en tenant compte des prix relatifs, issue d'une simulation de Monte-Carlo, dans le scénario KO et avant actualisation, en taux intermédiaire	300
Figure Annexe 15.3-1	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK	301
Figure Annexe 15.3-2	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK	302
Figure Annexe 15.3-3	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK	302

Figure Annexe 15.3-4	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO	303
Figure Annexe 15.3-5	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO	304
Figure Annexe 15.3-6	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option de projet 1 (Cigéo), avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO	304
Figure Annexe 16.2-1	Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour les branches de l'option 2	308
Figure Annexe 16.2-2	Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans l'option 2, en m ³	309
Figure Annexe 16.2-3	Chronique des coûts unitaires bruts de technologie prospective pour les déchets HA, de la branche 2.1.b, en euros ₂₀₁₉	312
Figure Annexe 16.3-1	Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branches 2.1.a et 2.2, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK	313
Figure Annexe 16.3-2	Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branche 2.1.b, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario OK	313
Figure Annexe 16.3-3	Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branches 2.1.a et 2.2, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO	314
Figure Annexe 16.3-4	Comparaison des chroniques de coûts de l'option 2, branche 2.1.b, avec prise en compte des prix relatifs (hypothèses haute, basse et intermédiaire), en scénario KO	314
Figure Annexe 16.4-1	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK	315
Figure Annexe 16.4-2	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK	316
Figure Annexe 16.4-3	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK	316
Figure Annexe 16.4-4	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO	317
Figure Annexe 16.4-5	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO	318
Figure Annexe 16.4-6	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 2, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO	318
Figure Annexe 17.2-1	Comparaison des chroniques des coûts de mise place de Cigéo dans la branche 3.1.a et dans l'option de projet 1	323
Figure Annexe 17.2-2	Chroniques des coûts de mise place de Cigéo pour la branche 3.1.a (retrait des premiers déchets HA et MA-VL de Cigéo), par type de coût	323
Figure Annexe 17.2-3	Comparaison des chroniques des coûts de mise place de Cigéo dans les branches 3.1.c et 3.2.a (déchets MA-VL uniquement dans Cigéo) et dans l'option de projet 1	324
Figure Annexe 17.2-4	Chronique des coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.c et 3.2.a (déchets MA-VL uniquement dans Cigéo), par type de coûts	324

Figure Annexe 17.2-5	Comparaison des chroniques de coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 (déchets HA et MA-VL dans Cigéo), et dans l'option de projet 1	325
Figure Annexe 17.2-6	Chronique de coûts de mise en place de Cigéo dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3 (déchets HA et MA-VL dans Cigéo) par type de coûts	326
Figure Annexe 17.2-7	Chronique des coûts de mise en place de Cigéo dans les branches de l'option 3	327
Figure Annexe 17.2-8	Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans la branche 3.1.a, en m ³	328
Figure Annexe 17.2-9	Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans les branches 3.1.c et 3.2.a, en m ³	329
Figure Annexe 17.2-10	Chronique de transport des déchets HA et MA-VL dans les branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3, en m ³	330
Figure Annexe 17.2-11	Chronique des coûts de transport des déchets HA et MA-VL pour les branches de l'option 3	330
Figure Annexe 17.2-12	Coût de la technologie prospective dans la branche 3.1.a de l'option 3 (HA et MA-VL dans la technologie prospective)	334
Figure Annexe 17.2-13	Chronique des coûts bruts de mise en place de la technologie prospective pour les branches 3.1.c et 3.2.a (HA uniquement dans la technologie prospective), par type de coûts, en € ₂₀₁₉	335
Figure Annexe 17.3-1	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario OK	336
Figure Annexe 17.3-2	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario OK	336
Figure Annexe 17.3-3	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario OK	337
Figure Annexe 17.3-4	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne haute du taux d'actualisation, dans le scénario KO	338
Figure Annexe 17.3-5	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne intermédiaire du taux d'actualisation, dans le scénario KO	338
Figure Annexe 17.3-6	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 3, avec la borne basse du taux d'actualisation, dans le scénario KO	339
Figure Annexe 18.2-1	Comparaison des chroniques des coûts de mise en place de Cigéo en 2070 dans les branches 4.1.a, 4.3.a, 4.6 et en 2100 dans la branche 4.7 de l'option 4	353
Figure Annexe 18.2-2	Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour les branches 4.1.c, 4.3.b et 4.4	354
Figure Annexe 18.2-3	Chronique des coûts de mise en place de Cigéo pour la branche 4.1.b	355
Figure Annexe 18.2-4	Comparaison des chroniques de transport des déchets MA-VL dans les branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b - 4.4 et 4.7, et dans l'option de projet 1, en m ³	358
Figure Annexe 18.2-5	Chronique de transport des déchets HA des branches 4.1.c et 4.3.b - 4.1.d et 4.2 - 4.4, en m ³	359
Figure Annexe 18.2-6	Chronique de transport des déchets MA-VL des branches 4.1.b - 4.1.d et 4.2, en m ³	360
Figure Annexe 18.2-7	Calendrier de la mise en place de Cigéo dans l'option de projet 1	361
Figure Annexe 18.2-8	Calendrier de la mise en place de Cigéo pour les branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b	362

Figure Annexe 18.2-9	Calendrier de la mise en place de Cigéo pour la branche 4.7	364
Figure Annexe 18.3-1	Hypothèses de probabilité d'occurrence des branches de l'option 4	369
Figure Annexe 18.3-2	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario OK	370
Figure Annexe 18.3-3	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario OK	371
Figure Annexe 18.3-4	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario OK	371
Figure Annexe 18.3-5	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident	372
Figure Annexe 18.3-6	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident	373
Figure Annexe 18.3-7	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident	373
Figure Annexe 18.3-8	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident	374
Figure Annexe 18.3-9	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident	375
Figure Annexe 18.3-10	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, dans le scénario KO avec prise en compte du risque d'accident	375
Figure Annexe 18.4-1	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne haute, dans le scénario OK avec valeur d'option	380
Figure Annexe 18.4-2	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne intermédiaire, dans le scénario OK avec valeur d'option	380
Figure Annexe 18.4-3	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4, avec prise en compte du risque d'accident, en borne basse, dans le scénario OK avec valeur d'option	381
Figure Annexe 18.4-4	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne haute, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option	382
Figure Annexe 18.4-5	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne intermédiaire, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option	382
Figure Annexe 18.4-6	Histogramme des résultats de la simulation de Monte-Carlo des coûts actualisés de l'option 4 en borne basse, avec prise en compte du risque d'accident, dans le scénario KO avec valeur d'option	383
Figure Annexe 19.3-1	Chronique de coûts pour un décalage de 10 ans de l'option de projet 1	386

Figure Annexe 19.3-2	Chronique de coûts pour un décalage de 20 ans de l'option de projet 1	386
Figure Annexe 19.3-1	Calcul du bénéfice assurantiel	387

Tableaux

Tableau 2.1-1	Bilan des volumes de déchets déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2018 (Andra, 2020 (9))	37
Tableau 2.2-1	Modalités de gestion des différentes catégories de déchets radioactifs	39
Tableau 2.5-1	Panorama international des modalités de gestion des déchets HA et MA-VL parmi 13 pays et la France	51
Tableau 3.2-1	Résumé des valeurs des bêtas socioéconomiques en scénario OK	66
Tableau 3.2-2	Résumé des valeurs des bêtas socioéconomiques en scénario KO	67
Tableau 3.3-1	Taux sans risque, dans le scénario OK	72
Tableau 3.3-2	Les taux d'actualisation en scénario OK	73
Tableau 3.3-3	Taux sans risque, dans le scénario KO	78
Tableau 3.3-4	Les taux d'actualisation du scénario KO	79
Tableau 3.3-5	Récapitulatif des taux d'actualisation utilisés dans l'évaluation socioéconomique	83
Tableau 5.1-1	Coûts unitaires de mise en place de Cigéo dans les différentes branches des options 2, 3 et 4	116
Tableau 5.1-2	Estimation du coût de recherche du site actuel de stockage géologique profond, des premières investigations à l'obtention du décret d'autorisation de création	122
Tableau 5.1-3	Estimation du coût de recherche du site de Meuse/Haute-Marne, des premières investigations à l'obtention du décret d'autorisation de création	124
Tableau 5.1-4	Extrapolation du coût de recherche d'un nouveau site pour le stockage géologique profond	126
Tableau 5.1-5	Estimation du coût du forage profond aux États-Unis d'Amérique	127
Tableau 5.1-6	Estimation du coût de forage profond en France pour tous les déchets HA	128
Tableau 5.1-7	Estimation des coûts annexes pour une technologie prospective de type forage profond	129
Tableau 5.1-8	Coût du processus de densification de l'étude CEA	131
Tableau 5.1-9	Estimation du coût de processus de densification	132
Tableau 5.1-10	État des lieux actuel des installations d'entreposage temporaire des déchets MA-VL et HA en France	135
Tableau 5.1-11	Récapitulatif des coûts unitaires	139
Tableau 5.2-1	Coût brut de l'option de projet 1, en € ₂₀₁₉	142
Tableau 5.2-2	Estimation du coût de l'option de projet 1 avec prise en compte des prix relatifs et de l'aléa	145
Tableau 5.2-3	Estimation du coût de l'option de projet 1 avec prise en compte du temps long (actualisation)	147
Tableau 5.3-1	Coût brut de l'option 2, en € ₂₀₁₉	149
Tableau 5.3-2	Coût des branches de l'option 2 en tenant compte des aléas sur les coûts et de l'évolution des prix relatifs, en € ₂₀₁₉	153
Tableau 5.3-3	Récapitulatif du coût de l'option de projet 1 et de l'espérance de l'option 2, en fonction des taux d'actualisation et scénarii	155
Tableau 5.4-1	Coût brut de l'option 3, en € ₂₀₁₉	157
Tableau 5.4-2	Coût simulé des branches de l'option 3 en tenant compte de l'aléa des coûts et de l'évolution des prix relatifs, en € ₂₀₁₉	160
Tableau 5.4-3	Récapitulatif du coût de l'option de projet 1 et de l'espérance de l'option 3, en fonction des taux d'actualisation et scénarii	162
Tableau 5.5-1	Coût brut de l'option 4, en € ₂₀₁₉	164
Tableau 5.5-2	Comparaison des coûts de l'option de projet 1 et de l'option 4, en scénario OK	177
Tableau 5.5-3	Comparaison des coûts de l'option de projet 1 et de l'option 4, en scénario KO (uniquement sur les coûts)	177

Tableau 5.6-1	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne haute du taux d'actualisation	178
Tableau 5.6-2	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, valeur intermédiaire du taux d'actualisation	178
Tableau 5.6-3	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne basse du taux d'actualisation	179
Tableau 5.6-4	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne haute du taux d'actualisation	179
Tableau 5.6-5	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne intermédiaire du taux d'actualisation	180
Tableau 5.6-6	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario KO, borne basse du taux d'actualisation	180
Tableau 6.3-1	Probabilité d'incendie en entreposage, dans les différentes options en scénario KO	189
Tableau 6.4-1	Rayon (en km) des périmètres des actions d'urgence et actions post-accidentelles, source IRSN	196
Tableau 6.4-2	Récapitulatif des surfaces pour lesquelles des conséquences radiologiques sont chiffrées, autour du site de Marcoule, en cas d'incendie de l'entrepôt	199
Tableau 6.4-3	Population concernée par les périmètres P1, P2 et P3 autour du site de Marcoule	199
Tableau 6.4-4	Récapitulatif des surfaces pour lesquelles des conséquences radiologiques sont chiffrées, autour du site de La Hague, en cas d'incendie de l'entrepôt	200
Tableau 6.4-5	Population concernée par les périmètres P1, P2 et P3 autour du site de la Hague	200
Tableau 6.5-1	La classification des déchets radioactifs en France sur le critère d'activité massique	204
Tableau 6.5-2	Volumes de déchets produits par l'accident de Fukushima, sur le périmètre SDA et ICSA inclus dans la préfecture de Fukushima, selon leur niveau de radioactivité exprimé en classification française	204
Tableau 6.5-3	Volumes de déchets produits par l'accident de Fukushima, sur le périmètre à l'extérieur de la préfecture de Fukushima, selon leur niveau de radioactivité exprimé en classification française	205
Tableau 6.5-4	Synthèse des données de coûts utilisées dans l'estimation des dommages	208
Tableau 6.5-5	Coût estimé d'un accident fictif sur le site d'entreposage de Marcoule	208
Tableau 6.5-6	Coût estimé d'un accident fictif sur le site d'entreposage de la Hague	209
Tableau 6.6-1	Coût actualisé d'un incendie en entreposage	210
Tableau 6.6-2	Coût actualisé de la branche 4.4, avec et sans accident	210
Tableau 6.6-3	Coût actualisé de la branche 4.7, avec et sans accident	210
Tableau 6.6-4	Coût actualisé de la branche 4.5, avec et sans accident	211
Tableau 6.6-5	Coût actualisé de la branche 4.8, avec et sans accident	212
Tableau 6.6-6	Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation élevé, en scénario KO	216
Tableau 6.6-7	Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation intermédiaire, en scénario KO	216
Tableau 6.6-8	Récapitulatif des différences de coûts (y compris accident) entre les options de projet 1 et 4, avec un taux d'actualisation bas, en scénario KO	216
Tableau 6.6-1	Les valeurs de taux d'actualisation appliquées dans les deux scénarii	223

Tableau 7.1-1	Synthèse des résultats par scénario et taux d'actualisation, avec probabilité d'occurrence sur 10 000 tirages	224
Tableau 7.1-2	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne basse du taux d'actualisation	225
Tableau 7.1-3	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, taux d'actualisation intermédiaire	226
Tableau 7.1-4	Récapitulatif des coûts des différentes options, dans un scénario OK, borne haute du taux d'actualisation	226
Tableau 7.1-5	Option 4 sans et avec valeurs d'options en scénario OK et comparaison avec l'option de projet 1	227
Tableau 7.1-6	Récapitulatif des coûts des options de projet, dans un scénario KO, borne basse du taux d'actualisation	229
Tableau 7.1-7	Récapitulatif des coûts des options de projet, dans un scénario KO, taux d'actualisation intermédiaire	229
Tableau 7.1-8	Récapitulatif des coûts des options de projet, en scénario KO, taux d'actualisation haut	230
Tableau 7.1-9	Option 4 sans et avec valeurs d'options dans un scénario KO et comparaison avec l'option de projet 1	231
Tableau 7.2-1	Estimation du bénéfice assurantiel du centre de stockage Cigéo, en fonction de la probabilité de tomber dans un scénario KO	236
Tableau Annexe 6.3-1	Installations de stockage pour les déchets de faible activité et transuraniens (respectivement LLW et TRU)	264
Tableau Annexe 9.3-1	Lieux d'entreposage des déchets radioactifs	275
Tableau Annexe 12.4-1	Coûts de gestion des déchets radioactifs et du démantèlement des réacteurs nucléaires en Suède	287
Tableau Annexe 14.1-1	Taux d'actualisation $r = \gamma\mu$, Gollier (2016 (55))	293
Tableau Annexe 14.1-2	Taux d'actualisation $r = \gamma\mu - \text{effet précaution}$, Gollier (2016 (55))	294
Tableau Annexe 15.1-1	Solutions de gestion de l'option de projet 1	298
Tableau Annexe 15.1-2	Hypothèses de l'option de projet 1	298
Tableau Annexe 15.3-1	Résultats actualisés de l'option de projet 1 en scénario OK	301
Tableau Annexe 15.3-2	Résultats actualisés de l'option de projet 1 en scénario KO	303
Tableau Annexe 16.1-1	Solutions de gestion de l'option 2	305
Tableau Annexe 16.1-2	Hypothèses de l'option 2 - Branches 2.1.a et 2.2	305
Tableau Annexe 16.1-3	Hypothèses de l'option 2 - Branche 2.1.b	306
Tableau Annexe 16.2-1	Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 2, en M€ ₂₀₁₉	308
Tableau Annexe 16.2-2	Coût brut de transport dans l'option 2, en millions d'euros ₂₀₁₉	310
Tableau Annexe 16.2-3	Surcoût brut d'entreposage des déchets HA dans l'option 2 relativement celui de l'option de projet 1, en millions d'euros ₂₀₁₉	310
Tableau Annexe 16.2-4	Coût brut de recherche de site dans l'option 2, en millions d'euros ₂₀₁₉	311
Tableau Annexe 16.2-5	Coût brut de la technologie prospective dans l'option 2, en millions d'euros ₂₀₁₉	312
Tableau Annexe 16.4-1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	315
Tableau Annexe 16.4-2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO	317
Tableau Annexe 17.1-1	Solutions de gestion de l'option 3	319
Tableau Annexe 17.1-2	Hypothèses de l'option 3 - Branche 3.1.a	319
Tableau Annexe 17.1-3	Hypothèses de l'option 3 - Branches 3.1.b, 3.2.b et 3.3	320
Tableau Annexe 17.1-4	Hypothèses de l'option 3 - Branches 3.1.c et 3.2.a	321
Tableau Annexe 17.2-1	Coût brut de mise en place de Cigéo dans l'option 3, en millions d'euros ₂₀₁₉	327
Tableau Annexe 17.2-2	Coût brut de transport dans l'option 3, en millions d'euros ₂₀₁₉	331
Tableau Annexe 17.2-3	Coût brut d'entreposage de l'option 3, en millions d'euros ₂₀₁₉	332
Tableau Annexe 17.2-4	Coût brut de densification et mise en forage profond des déchets MA-VL dans la branche 3.1.a	333

Tableau Annexe 17.2-5	Coût brut de la technologie prospective pour les déchets HA dans les branches 3.1.c et 3.2.a, en millions d'euros ₂₀₁₉	335
Tableau Annexe 17.3-1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	335
Tableau Annexe 17.3-2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO	337
Tableau Annexe 18.1-1	Solutions de gestion de l'option 4	340
Tableau Annexe 18.1-2	Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6	340
Tableau Annexe 18.1-3	Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.1.b	341
Tableau Annexe 18.1-4	Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.c et 4.3.b	342
Tableau Annexe 18.1-5	Hypothèses de l'option 4 - Branches 4.1.d et 4.2	343
Tableau Annexe 18.1-6	Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.4	344
Tableau Annexe 18.1-7	Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.5	346
Tableau Annexe 18.1-8	Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.7	347
Tableau Annexe 18.1-9	Hypothèses de l'option 4 - Branche 4.8	348
Tableau Annexe 18.2-1	Coût brut de recherche de site dans l'option 4	351
Tableau Annexe 18.2-2	Coût brut d'une technologie prospective pour les déchets MA-VL uniquement	357
Tableau Annexe 18.2-3	Coût brut de transport dans l'option 4	360
Tableau Annexe 18.2-4	Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.b), en millions d'euros ₂₀₁₉	362
Tableau Annexe 18.2-5	Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond (branches 4.1.a, 4.3.a et 4.6 - 4.1.c et 4.3.b), en millions d'euros ₂₀₁₉	363
Tableau Annexe 18.2-6	Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par stockage géologique profond sur nouveau site (dans la branche 4.7), en millions d'euros ₂₀₁₉	364
Tableau Annexe 18.2-7	Coût d'entreposage des déchets MA-VL gérés par stockage géologique profond sur nouveau site (dans les branches 4.4 et 4.7), en millions d'euros ₂₀₁₉	365
Tableau Annexe 18.2-8	Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par technologie prospective (dans les branches 4.1.b - 4.1.d et 4.2) en millions d'euros ₂₀₁₉	366
Tableau Annexe 18.2-9	Coût brut d'entreposage des déchets MA-VL gérés par entreposage de longue durée renouvelé (dans les branches 4.5 et 4.8), en millions d'euros ₂₀₁₉	366
Tableau Annexe 18.2-10	Coût brut d'entreposage des déchets HA gérés par entreposage de longue durée renouvelé (dans la branche 4.8), en millions d'euros ₂₀₁₉	367
Tableau Annexe 18.2-11	Coût d'entreposage des branches de l'option 4	367
Tableau Annexe 18.3-1	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK	370
Tableau Annexe 18.3-2	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, sans prise en compte du risque d'accident	372
Tableau Annexe 18.3-3	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec prise en compte du risque d'accident	374
Tableau Annexe 18.4-1	Exemples de valeurs de tirages	376
Tableau Annexe 18.4-2	Règle de décision à chaque nœud de décision avec valeur d'option	378
Tableau Annexe 18.4-3	Probabilité à chaque nœud de décision	379
Tableau Annexe 18.4-4	Approche probabiliste avec actualisation, scénario OK, avec valeur d'option	379
Tableau Annexe 18.4-5	Approche probabiliste avec actualisation, scénario KO, avec valeur d'option	381
Tableau Annexe 19.2-1	Coût brut de l'option de projet 1 et de ses variantes : décalage de 10 ans et de 20 ans	385

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Code de l'environnement. Partie législative. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IV : Déchets. Chapitre II : Dispositions particulières à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs (Article L542-1) (2016). Code de l'environnement.
- 2 Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (2016). Journal officiel de la République française.
- 3 Les déchets radioactifs et les sites et sols pollués : chapitre 14 du rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2019. Autorité de sûreté nucléaire (2020). Disponible à l'adresse : <https://www.asn.fr/content/download/170685/1752050/version/2/file/Chapitre%2014%20-%20Les%20d%C3%A9chets%20radioactifs%20et%20les%20sites%20et%20sols%20pollu%C3%A9s.pdf>.
- 4 Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (2006). Journal officiel de la République française, N°93, pp.9721.
- 5 Décret n°2013-1211 du 23 décembre 2013 relatif à la procédure d'évaluation des investissements publics en application de l'article 17 de la loi n° 2012-1558 du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques pour les années 2012 à 2017 (2013).
- 6 Arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût objectif afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2016). Journal officiel de la République française, N°DEVR1601524A.
- 7 Nuclear Power in a Clean Energy System. IEA (2019). Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>.
- 8 Les déchets radioactifs : classification. Andra (2020). Consulté le 02/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/tout-comprendre-sur-la-radioactivite/classification>.
- 9 Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Les essentiels 2020. Andra (2020). Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-maj_essentiels_2020-web.pdf.
- 10 Rapport d'évaluation n°8. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2014). Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_8_062014.pdf.
- 11 Évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport de la mission présidée par Emile Quinet. Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2013). Disponible à l'adresse : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/CGSP_Evaluation_socioeconomique_17092013.pdf.
- 12 Zweifel, P.; Schneider, Y.; Wyss, C. Spatial Effects in Willingness-to-Pay: The Case of Nuclear Risks. University of Zurich (2005), Socioeconomic Institute.
- 13 Coût économique des accidents nucléaires. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013). Consulté le 31/10/2019. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/cout-economique-accident/Pages/sommaire.aspx#.XbrkVuhA6Uk.

- 14 Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er février 2006, sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL), menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV. Autorité de sûreté nucléaire (2015).
- 15 Munro, A. Notes on the economic valuation of nuclear disasters. National graduate institute for policies studies (2011). 30 p. Disponible à l'adresse : <http://www3.grips.ac.jp/~munro/notes%20nuclear%20valuation%20a.pdf>.
- 16 Weitzman, M.L. Gamma Discounting. American Economic Review (2001). Vol 91, N°1, pp.260-71.
- 17 Stern, N.H. The economics of climate change: The Stern review. Cambridge University Press (2007). ISBN : 978-0521700801.
- 18 Nordhaus, W. A question of balance: Weighing the options on global warming policies. Yale University Press (2008). ISBN : 9780300209396.
- 19 The worst except for all the others. The Economist (2018). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.economist.com/graphic-detail/2018/12/15/gdp-predictions-are-reliable-only-in-the-short-term>.
- 20 Décret n°2001-1053 du 5 novembre 2001 portant publication de la convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, faite à Vienne le 5 septembre 1997 (avec convention en annexe). Journal officiel de la République française (2001).
- 21 Directive n°2011/70/EURATOM du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. Conseil de l'Union Européenne (2011). Journal officiel de l'Union européenne, N°L199, pp.48-56.
- 22 Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1992). Journal officiel de la République française, N°1.
- 23 Code de l'environnement Partie législative Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Titre IV : Déchets. Chapitre II : Dispositions particulières à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs (Article L.542-12) (2016). Code de l'environnement.
- 24 Barthe, Y. Le pouvoir d'indécision : La mise en politique des déchets nucléaires. Economica (2006). Etudes politiques. ISBN : 2717851399.
- 25 Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 modifiée relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Version consolidée au 12 juillet 2014 (2006).
- 26 L'ASN. Autorité de sûreté nucléaire (2020). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.asn.fr/L-ASN>.
- 27 Rieu, J., Niel, J.-C., Bodenez, P. Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fv1_2_.
- 28 L'ASN estime que les options de sûreté de Cigéo constituent une avancée significative. Autorité de sûreté nucléaire (2018). Consulté le 02/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Avis-de-l-ASN-sur-les-options-de-surete-de-Cigeo>.
- 29 La CNE2 en quelques mots. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2010). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <http://www.cne2.fr/>.
- 30 Revue internationale par les pairs sur le "Dossier d'options de sûreté" du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde : CIGEO - Rapport de la revue par les pairs. AIEA (2016). Disponible à l'adresse : <https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Rapport-de-la-revue-par-les-pairs-CIGEO-dec-2016?>

- 31 Décret du 3 août 1999 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs à installer et exploiter sur le territoire de la commune de Bure (Meuse) un laboratoire souterrain destiné à étudier les formations géologiques profondes où pourraient être stockés des déchets radioactifs (1999). Journal officiel de la République française, N°180, pp.11925.
- 32 Proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo. Version 1 pour consultation. Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-15-0063. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-08/proposition%20PDE%20avril%202016.pdf>.
- 33 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf>.
- 34 Dossier d'options de sûreté - partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). G-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062/A. 467 p. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.
- 35 Dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOA-RV00000150059. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-11/CG-TE-D-NTE-AMOA-RV0-0000-15-0059-A%20DOREC.pdf>.
- 36 The Disposal of Radioactive Waste on Land. National Academies Press (1957). ISBN : 978-0-309-58067-0.
- 37 Deep geological disposal. IAEA (2009). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/newscenter/multimedia/podcasts/deep-geological-disposal>.
- 38 Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue - Rapport établi en réponse à une saisine de la Commission nationale du débat public. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2019). IRSN/2019-00318. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_Rapport-2019-00318_Alternatives-Stockage-Geologique-Dechets-HAMAVL.pdf.
- 39 Geological disposal. Review of alternative radioactive waste management options. Radioactive waste management (2017). NDA/RWM/146. 95 p. Disponible à l'adresse : <https://rwm.nda.gov.uk/publication/geological-disposal-review-of-alternative-radioactive-waste-management-options/?download>.
- 40 L'Andra fait l'inventaire des déchets radioactifs. Société Française d'Énergie Nucléaire (2018). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.sfen.org/rgn/andra-inventaire-dechets-radioactifs>.
- 41 Maddison Project Database 2018. University of Groningen (2018). Consulté le 03/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2018>.
- 42 States of fragility 2016. Understanding violence. OCDE (2016).
- 43 Olson, M. Dictatorship, Democracy, and Development. The American Political Science Review (1993). Vol 87, N°3, pp.567-76.
- 44 Barro, R. Determinants of Economic Growth: A Cross-Country Empirical Study. National Bureau of Economic Research (1996).
- 45 Acemoglu, D., Johnson, S., Robinson, J.-A. The colonial origins of comparative development: an empirical investigation. The American economic review (2001). Vol 91, N°5, pp.1369-401.
- 46 Haggard, S., Tiede, L. The Rule of Law and Economic Growth: Where are We? World development (2011). Vol 39, N°5, pp.673-85.

- 47 Acemoglu, D., Johnson, S. Unbundling Institutions. *Journal of political economy* (2005). Vol 113, N°5.
- 48 Acemoglu, D., Robinson, J.-A. *Why nations fail. The origins of power, prosperity, and poverty.* Crown publishers (2012).
- 49 Acemoglu, D., Robinson, J.-A., Santos, R.-J. The Monopoly of violence: evidence from Colombia. *Journal of the European Economic Association* (2013). Vol 11, pp.5–44.
- 50 Huntington, S.P. *Political order in changing societies.* Yale University (1968). ISBN : 0-300-00584-9.
- 51 Mazza, S., Munck, G. State or democracy first? Alternative perspectives on the state-democracy nexus. *Democratization* (2014). Vol 21, N°7, pp.1221–43.
- 52 Carothers, T. The sequencing fallacy. *Journal of democracy* (2007). Vol 18, N°1, pp.12–27.
- 53 Deacon, R. *Dictatorship, democracy and the provision of public goods* (2003). University of California at Santa Barbara, Economics Working Paper Series qt9h54w76c.
- 54 Baumstark, L., Hirtzman, P., Lebegue, D. Révision du taux d'actualisation des investissements publics : rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue. Commissariat général au plan (2005). 112 p. Disponible à l'adresse : http://metroauxrigollots.fr/archives/pdf/SW54/Rapport_Lebegue_Revision_Taux_Actualisation_Investissements_Publics.pdf.
- 55 Gollier, C. Valorisation des investissements ultra-longes et développement durable. *L'Actualité économique* (2016). Vol 92, N°4, pp.667–701.
- 56 Centre d'analyse stratégique. *Le calcul du risque dans les investissements publics. Rapport de la mission présidée par Christian Gollier.* La Documentation Française (2011). Rapports et documents. Vol 36. ISBN : 978-2-11-008737-9.
- 57 Arrow, K.J., Cropper, M.L., Gollier, C., Groom, B., Heal, G.M., Newell, R.G., Nordhaus, W., Pindyck, R.S., Pizer, W.A., Portney, P.R., Sterner, T., Tol, R.S.J., Weitzman, M.L. Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis? *Review of Environmental Economics and Policy* (2014). Vol 8, N°2, pp.145–63.
- 58 Hurst, M. *The Green Book: Central Government Guidance on Appraisal and Evaluation.* OGL Press (2018). ISBN : 978-1-912225-57-6.
- 59 A social time preference for use in long-term discounting. OXERA Consulting Ltd (2002). 80 p. Disponible à l'adresse : <https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2018/03/Social-time-preference-rate-for-use-in-long-term-discounting.pdf>.
- 60 Christensen, P., Gillingham, K., Nordhaus, W. Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2018). Vol 115, N°21, pp.5409–14.
- 61 Décision consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de la transition écologique et solidaire; Autorité de sûreté nucléaire (2020).
- 62 Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue - Loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs : bilan des recherches conduites sur la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue et sur le développement de réacteurs nucléaires de nouvelle génération. CEA (2012). 88 p. Disponible à l'adresse : <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires/Tome%202.pdf>.
- 63 *La séparation/transmutation des déchets à vie longue. Thème 1 - La place de Cigéo dans le dispositif de gestion des déchets.* Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013).

- FS 1-4. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Transmutation.pdf.
- 64 Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and R&D Needs. Fuel Cycle Research & Development. Sandia National Laboratories (2013). SAND2013-9490P. 221 p. Disponible à l'adresse : <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/DeepBorehDisposalRDDemoSiteGuideDesignSealsNeeds.pdf>.
- 65 Allen Bates, E. Optimization of deep boreholes for disposal of high-level nuclear waste (2015). Massachusetts Institute of Technology (MIT). Phd Thesis in nuclear science and engineering. 281 p.
- 66 Évaluation des coûts afférents à la mise en oeuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue - Proposition de l'Andra Tome 1 Chiffrage de Cigéo en phase esquisse : synthèse. Andra (2014). Document N°CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.0000.14.0107/A. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/cout-cigeo-t1.pdf>.
- 67 Évaluation des coûts afférents à la mise en oeuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue - Proposition de l'Andra Tome 2 Chiffrage de Cigéo en phase esquisse : estimation du coût de base de l'exploitation. Andra (2014). Document N°CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.0000.14.0068/B. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/cout-cigeo-t2.pdf>.
- 68 Toutes nos publications. Andra (2020). Consulté le 22/07/2020. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/publications?f%5B0%5D=facet_doc_cat%3A224.
- 69 Documents téléchargeables. Objectif Meuse (2020). Consulté le 23/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.objectifmeuse.org/documents-telechargeables/>.
- 70 Documents. GIP Haute-Marne (23/07/2020). Consulté le 23/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.gip-haute-marne.fr/documents.html>.
- 71 Présentation du "Cycle du combustible" français en 2018. Haut Comité sur la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) (2018). Disponible à l'adresse : http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/HCTISN_rapport_cycle_2018_cle0af1f2.pdf.
- 72 Évaluation technico-économique d'un procédé de traitement d'enrobés de boues bitumées par incinération/vitrification (Rapport PNGMDR 2013-2015). CEA (2015). Disponible à l'adresse : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiP8vja2K_I AhWDyoUKHSNKDCgQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.asn.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F96859%2F697779%2Fversion%2F1%2Ffile%2FEvaluation%2520technico-%25C3%25A9conomique%2520traitement%2520boues%2520bitum%25C3%25A9es.pdf&usg=AOvVaw2JjzNo_g_B0A2SugkSzMD3.
- 73 Liste des installations nucléaires de base au 31 décembre 2016 - Annexe au rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2016. Autorité de sûreté nucléaire (2017). Disponible à l'adresse : https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiYv5Tpl_XpAhUO0uAKHetJDnIQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fwww.asn.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F111682%2F939344%2Fversion%2F1%2Ffile%2FAnnexe%2520-%2520Liste%2520des%2520installations%2520nucl%25C3%25A9aire%2520de%2520base%2520au%252031%2520d%25C3%25A9cembre%25202016.pdf&usg=AOvVaw2ywgjpvWWyZ8gB6IrE1ShO.
- 74 Entreposage du combustible nucléaire utilisé : concepts et enjeux de sûreté. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2018). Rapport IRSN n°2018-00003. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_Rapport-2018-00003_Entreposage-du-combustible-nucleaire-use.pdf.

- 75 Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Andra (2013). Document N°CRPADPG130001.
- 76 Forbes, P. Les entreposages de colis de déchets HA-MAVL - Etat des lieux des capacités actuelles et futures (à 2040). New AREVA (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/Les-entreposages-de-colis-de-dechets-HA-MAVL-Etat-des-lieux-des-capacites-actuelles-et-futures-Areva?>
- 77 Les difficultés techniques sur l'EPR "sont liées à la perte d'expérience" (Pierre-Franck Chevet, ASN). La Tribune (2018).
- 78 Courrier à la Directrice de l'Energie sur la consultation formelle sur le dossier de chiffrage du stockage des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue en application de l'article L542-12 du code de l'environnement. EDF; AREVA; CEA (2015).
- 79 Baromètre 2020 : La perception des risques et de la sécurité par les français : l'analyse. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2020). Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/IRSN/Publications/barometre/Documents/IRSN_Barometre_2020-analyse.pdf.
- 80 About the ADR: Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par la route. UNECE (2020). Consulté le 11/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.unece.org/fr/trans/danger/publi/adr/adr_f.html.
- 81 Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute-Marne (Cigéo), du 15 mai au 15 décembre 2013. Compte-rendu établi par le président de la commission particulière du débat public. Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2014). 100 p. Disponible à l'adresse : <https://www.debatpublic.fr/file/532/download?token=bgCg46rH>.
- 82 The Fukushima Daiichi Accident - Technical volume 5/5 Post-accident recovery. AIEA (2015). Disponible à l'adresse : <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV5-Web.pdf>.
- 83 Environmental remediation in Japan. Ministry of the Environment Japan (2018). Disponible à l'adresse : http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf.
- 84 Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013). PRP-CRI/SESUC/2013-00261. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-PRP-CRI-SESUC-2013-00261_methodologie-cout-accident.pdf.
- 85 Accident de la centrale nucléaire Fukushima Dai-Ichi - Décontamination et gestion des déchets - Point de situation en mars 2015. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2015). Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-fukushima-2011/fukushima-2015/Documents/IRSN_Fukushima_decontamination-gestion-dechets_201503.pdf.
- 86 Le coût économique pour deux scénarios d'accident. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2020). Consulté le 11/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/cout-economique-accident/Pages/2-cout-economique-pour-2-scenarios.aspx?dId=b5e6d248-170f-4f79-a514-8fb9cb86a6d5&dwId=0dd84144-5e15-4e92-b9ef-be117439b36b#.XuHk1UUzbIV.
- 87 PNGMDR 2013-2015 Schéma industriel pour la gestion de déchets TFA. Andra (2015). Document N°PI NT ADI 150006. Disponible à l'adresse : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/pintadi150006.pdf>.
- 88 Classification des déchets radioactifs. Andra (2020). Consulté le 11/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>.

- 89 Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. World Health Organization (2013). 172 p. Disponible à l'adresse : https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78218/9789241505130_eng.pdf;jsessionid=B94B0ABAD3F7D05A6C5DF44EF729BF24?sequence=1.
- 90 Arrow, K.J., Lind, R. Uncertainty and the Evaluation of Public Investment Decisions. *The American economic review* (1970). Vol 60, N°3, pp.364-78.
- 91 Baumstark, L., Gollier, C. The relevance and the limits of the Arrow-Lind Theorem. *Journal of Natural Resources Policy Research* (2014). Vol 6, N°1, pp.45-9.
- 92 Bommier, A., Zuber, S. Can preferences for catastrophe avoidance reconcile social discounting with intergenerational equity? *Social Choice and Welfare* (2008). Vol 31, N°3, pp.415-34.
- 93 Rheinberger, C.M., Treich, N. Attitudes Toward Catastrophe. *Environmental and Resource Economics* (2017). Vol 67, N°3, pp.609-36.
- 94 Itaoka, K., Saito, A., Krupnick, A., Adamowicz, W., Taniguchi, T. The Effect of Risk Characteristics on the Willingness to Pay for Mortality Risk Reductions from Electric Power Generation. *Environmental and Resource Economics* (2006). Vol 33, N°3, pp.371-98.
- 95 Sun, C., Zhu, X. Evaluating the public perceptions of nuclear power in China: Evidence from a contingent valuation survey. *Energy Policy* (2014). Vol 69, pp.397-405.
- 96 Slovic, P. Perception of risk. *Science* (1987). Vol 236, N°4799, pp.280-5.
- 97 Slovic, P., Flynn, J.H., Layman, M. Perceived Risk, Trust, and the Politics of Nuclear Waste. *Science* (1991). Vol 254, N°5038, pp.1603-7.
- 98 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Allemagne. AEN; OCDE (2011). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/allemande.pdf>.
- 99 Nuclear power in Germany. World nuclear association (2019). Consulté le 18/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>.
- 100 Repository site selection Act - StandAG (2017). Federal law gazette, pp.2553.
- 101 Bracke, G., Charlier, F., Liebscher, A., Schilling, F., Röckel, T. About the Possibility of Disposal of HLRW in Deep Boreholes in Germany. *Geosciences* (2017). Vol 7, N°3, pp.58.
- 102 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Belgique. OCDE; AEN (2003). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/belgique.pdf>.
- 103 Sixth meeting of the contracting parties to the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management : national report. Kingdom of Belgium (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/sites/default/files/joint-convention-rapport-be-2017-final-noannex.pdf>.
- 104 Loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980 (1980). JUSTEL, N°1980080802.
- 105 Loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement (2006). Moniteur belge, N°2006-958, pp.14491.
- 106 Loi du 3 juin 2014 modifiant l'article 179 de la loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980 en vue de la transposition dans le droit interne de la Directive 2011/70/Euratom (2014). Moniteur belge.

- 107 Loi du 11 avril 2003 sur les provisions constituées pour le démantèlement des centrales nucléaires et pour la gestion des matières fissiles irradiées des centrales (2003). Moniteur belge.
- 108 Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter (London Convention) (1972). Convention de Londres.
- 109 Programme national de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs : document établi par le Comité du programme national en application de la loi du 3 juin 2014. Royaume de Belgique (2015). Disponible à l'adresse : <https://economie.fgov.be/sites/default/files/Files/Energy/Programme-national-cpnpc.pdf>.
- 110 Stockage géologique des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie. ONDRAF (2018). Consulté le 22/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.ondraf.be/stockage-g%C3%A9ologique-des-d%C3%A9chets-de-haute-activit%C3%A9-etou-de-longue-dur%C3%A9e-de-vie-0>.
- 111 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Canada. OCDE; AEN (2008). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/canada.pdf>.
- 112 Canadian national report for the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: sixth report October 2017. Canadian nuclear safety commission; Canada's nuclear regulator (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/sites/default/files/6rm-canada.pdf>.
- 113 Surveillance du cadre canadien pour la gestion des déchets radioactifs. Gouvernement du Canada (2018). Consulté le 23/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.cnsccsn.gc.ca/fra/resources/fact-sheets/oversight-canada-framework-radioactive-waste-management.cfm>.
- 114 Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires. Gouvernement du Canada (2020).
- 115 Loi sur les déchets de combustible nucléaire. Gouvernement du Canada (2020).
- 116 Financement du plan canadien de gestion à long terme sûre du combustible nucléaire irradié. Nuclear Waste Management Organization (NWMO) (2020). Disponible à l'adresse : <https://www.nwmo.ca/~media/Site/Files/PDFs/2020/03/09/18/27/Backgrounder-2020--Funding-Canadas-plan-for-the-safe-longterm-management-of-used-nuclear-fuel.ashx?la=fr>.
- 117 The People's Republic of China Fourth National Report for the Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management prepared for the Sixth review Meeting (2017). Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_china_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 118 China's nuclear fuel cycle. World nuclear association (2019). Consulté le 23/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>.
- 119 Regulations of the People's Republic of China on Safety Control of Civilian Nuclear Installations. People's Republic of China (2007), pp.http://www.fdi.gov.cn/1800000121_39_3529_0_7.html.
- 120 The Act of the People's Republic of China on Prevention and Control of Radioactive Pollution. People's Republic of China (2003).
- 121 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Espagne. OCDE; AEN (2010). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/espagne.pdf>.
- 122 Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: Sixth Spanish national report October 2017 (2017). Disponible à l'adresse :

- https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_spain_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 123 Radioactive waste management and decommissioning in Spain. OCDE (2018). Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Spain_report.pdf.
- 124 Nuclear power in the USA. World nuclear association (2020). Consulté le 21/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>.
- 125 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : États-Unis. OCDE; AEN (2008). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/etats-unis.pdf>.
- 126 U.S. Sixth national report for the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management. U.S. Department of Energy (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/sites/default/files/10-20-176thusnationalreportfinal.pdf>.
- 127 Nuclear waste policy act as amended with appropriations acts appended. U.S. Department of Energy (2004). Disponible à l'adresse : https://www.energy.gov/sites/prod/files/edg/media/nwpa_2004.pdf.
- 128 NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations. United States Nuclear regulatory commission (2020). Consulté le 22/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>.
- 129 Heard, R. G. DSRS Disposal - Current Practices and Issues in Member States (11-15 octobre 2010). International Workshop on "Sustainable Management of Disused Sealed Radioactive Sources".
- 130 Report to the Secretary of Energy. Blue Ribbon Commission on America's nuclear future (2012). Disponible à l'adresse : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf.
- 131 Strategy for the management and disposal of used nuclear fuel and high-level radioactive waste. U.S. Department of Energy (2013). Disponible à l'adresse : <https://www.energy.gov/sites/prod/files/Strategy%20for%20the%20Management%20and%20Disposal%20of%20Used%20Nuclear%20Fuel%20and%20High%20Level%20Radioactive%20Waste.pdf>.
- 132 Guidelines and discount rates for benefit-cost analysis of federal programs - Circular A-94 (2009).
- 133 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Finlande. OCDE; AEN (2008). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/finlande.pdf>.
- 134 Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: 6th Finnish National Report as referred to in Article 2 of the Convention. STUK (2017). STUK-B 218. Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_finland_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 135 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Japon. OCDE; AEN (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/japon.pdf>.
- 136 National report of Japan for the Sixth review meeting: joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management (2017). Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_japan_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 137 Atomic energy basic Act (1955), N°186.

- 138 Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (1957), N°166.
- 139 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Pays-bas. OCDE; AEN (2010). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/pays-bas.pdf>.
- 140 Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management : national report of the Kingdom of the Netherlands for the Sixth review meeting. Ministry of Infrastructure and the environment (2017). Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_netherlands_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 141 Nuclear power in the Netherlands. World nuclear association (2019). Consulté le 22/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/netherlands.aspx>.
- 142 Nuclear power in the United Kingdom. World nuclear association (2020). Consulté le 22/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>.
- 143 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Royaume-Uni. OCDE; AEN (2003). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/royaume-uni.pdf>.
- 144 The United Kingdom's Sixth national report on compliance with the obligations of the Joint convention on the safety of spent fuel and radioactive waste management. Department for business, energy & industrial strategy (2017). Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_united_kingdom_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 145 Radiation protection 122 - Practical use of the concepts of clearance and exemption - Part 1 Guidance on general clearance levels for practices: Recommendations of the group of experts established under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty. European Commission (2000). Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/122_part1.pdf.
- 146 Loi fédérale n°170 du 21 novembre 1995 sur l'utilisation de l'énergie atomique. Fédération de Russie (1995).
- 147 The fifth national report of the Russian Federation on compliance with the obligations of the joint convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management. State atomic energy corporation Rosatom (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/sites/default/files/russian-federation-eng-jc.pdf>.
- 148 Russia's nuclear fuel cycle. World nuclear association (2020). Consulté le 23/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle.aspx>.
- 149 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Suède. OCDE; AEN (2011). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/suede.pdf>.
- 150 Sweden's sixth national report under the Joint convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management. Ministry of the Environment Sweden (2017). Disponible à l'adresse : <https://www.iaea.org/sites/default/files/sweden-nr-6th-rm-jc.pdf>.
- 151 The Act on Nuclear Activities (1984).

- 152 Plan 2016 : Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power - Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020. SKB (2017). TR-17-02. Disponible à l'adresse : <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>.
- 153 Législation nucléaire des pays de l'OCDE et de l'AEN : Réglementation générale et cadre institutionnel des activités nucléaires : Suisse. OCDE; AEN (2003). Disponible à l'adresse : <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/suisse.pdf>.
- 154 Implementation of the obligations of the Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management : 6th national report of Switzerland in accordance with article 32 of the convention. Confédération Suisse (2017). Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_switzerland_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf.
- 155 Loi sur l'énergie nucléaire (LEnu) du 21 mars 2003. Assemblée fédérale de la Confédération suisse (2003). RS, N°732.1.
- 156 Ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENU) du 10 décembre 2004 (Etat le 1er février 2019). Conseil fédéral suisse (2004). RS, N°732.11.
- 157 Dietz, S., Gollier, C., Kessler, L. The climate beta. *Journal of Environmental Economics and Management* (2018). Vol 87, pp.258-74.



**AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS**

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr

