

Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050

SYNTHESE

8 novembre 2012



Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050

SYNTHESE – 8 novembre 2012

Durant l'année 2012, l'Agence a mobilisé ses services techniques et économiques sur l'exercice de prospective énergétique « Vision 2030-2050 » qui est synthétisé dans ce document.

Ce travail, réalisé en interne, permet à l'Agence de proposer des scénarios énergétiques et climatiques volontaristes axés sur la maîtrise de la consommation énergétique et le développement de l'offre d'énergies renouvelables. Cet exercice de prospective identifie ainsi une voie possible pour la transition énergétique en France, répondant aux enjeux environnementaux et identifiant les adaptations nécessaires de l'outil de production d'énergie français et les filières de croissance verte.

Deux horizons temporels et deux méthodologies distinctes

	Vision ADEME 2030	Vision ADEME 2050
Méthodologie	Exploratoire (forecast)	Normatif (backcast)
Objectif	Tendanciel volontariste	Facteur 4 : division par quatre des émissions de GES
Secteurs considérés	Tous secteurs	Tous secteurs
Indicateurs principaux	Energie, GES (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	Energie, GES (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)
Indicateurs environnementaux ex-post	Qualité de l'air, ressource en eau	Qualité de l'air, ressource en eau
Indicateurs économiques	PIB, emploi, investissements, balance commerciale, facture énergétique	Investissements, balance commerciale, facture énergétique
Prise en compte des conséquences du changement climatique	Non	Oui pour bâtiments et agriculture, (scénario A1B du rapport du GIEC)
Résultats		
Energie primaire (%2010)	181 Mtep (-30%)	79,8 Mtep (-48%) dont 70% ENR
Energie finale (%2010)	121,9 Mtep (-20%) dont 34% ENR	150 MtCO₂eq (-74%)
GES (%1990)	377 MtCO₂eq (-33%)	

Vision 2030

CADRAGE MACROECONOMIQUE ET DEMOGRAPHIQUE

Pour les deux scénarios, l'évolution démographique retenue est issue du scénario « fécondité haute » de l'INSEE à savoir 68 531 000 habitants en 2030 contre 62 881 000 aujourd'hui. L'hypothèse de décroissance du nombre de personnes par ménage de l'INSEE est également retenue (2,17 personnes par ménage en 2030 contre 2,31 aujourd'hui). Les paramètres macroéconomiques sont ceux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour les prix du pétrole, du gaz et du charbon en 2030, et ceux du Conseil d'analyse stratégique (CAS) pour la croissance du PIB, à savoir 1,8 % par an en moyenne sur la période.

Paramètres	Valeur 2010	Valeur 2030	Unité	Source
Pétrole	78.1	134.5	\$ ₂₀₁₀ /baril	AIE WEO 2011
Gaz	7.5	13	\$ ₂₀₁₀ /Mtu	AIE WEO 2011
Charbon	99.2	115.9	\$ ₂₀₁₀ /tonne	AIE WEO 2011
Croissance structurelle du PIB	1.8%/an sur la période			CAS

ENCADRE 1 : DONNEES MACROECONOMIQUE

BATIMENT ET ORGANISATION URBAINE

Le secteur du bâtiment (qui regroupe le résidentiel et le tertiaire) représente plus de 40 % de l'énergie finale consommée en France aujourd'hui.

➤ Un plan ambitieux de construction et de rénovations thermiques

Pour réduire les consommations dans ce secteur clé, l'hypothèse d'un plan ambitieux de construction neuve et de rénovations thermiques des bâtiments résidentiels et tertiaires est retenue pour 2030.

Le rythme de construction neuve serait augmenté, de 310 000 logements par an aujourd'hui à **350 000 par an**. Cette valeur est une moyenne sur la période 2010-2030 dont le rythme peut être modulé selon les arbitrages politiques, économiques et sociaux. En particulier, l'équilibre entre construction de logements collectifs et de maisons individuelles serait atteint en 2030 (contre 58% de maisons individuelles et 42% de logements collectifs dans le neuf actuellement). Si ces nouvelles constructions s'inscrivent dans une organisation urbaine nécessitant moins de transports et limitant l'artificialisation des sols, l'organisation urbaine à l'horizon 2030 est déjà largement fixée par le parc actuel.

En moyenne 500 000 logements feraient l'objet de rénovations thermiques par an. D'ici 2030, tout le parc de logement social construit avant 1990 serait ainsi rénové ainsi que 5 millions de maisons (pour plus de la moitié, construites avant 1975), soit plus de 70 % des maisons individuelles.

➤ Des équipements plus performants pour un niveau de confort au moins équivalent

Concernant les deux principaux postes de consommation des bâtiments résidentiels, le niveau de confort est considéré inchangé (température dans les bâtiments, quantités d'eau chaude

sanitaire consommées). Les besoins diminuent globalement grâce aux travaux d'isolation, et sont satisfaits par des technologies bien plus efficaces énergétiquement que les appareils actuels.

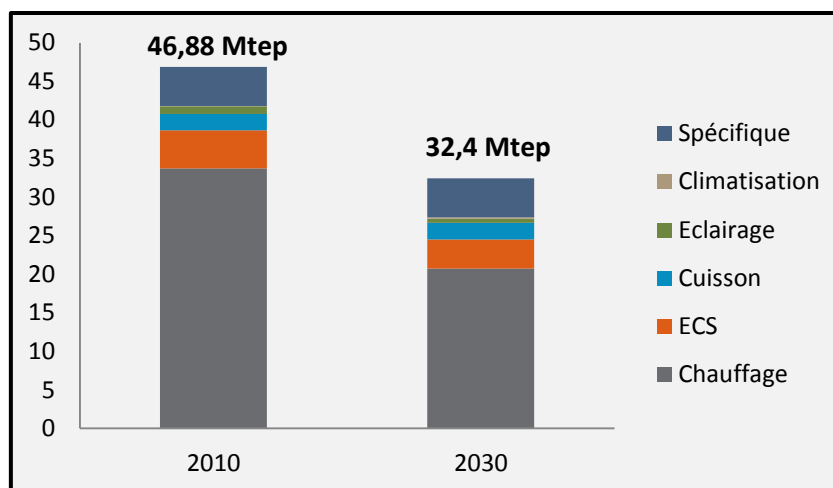
- **Pour le chauffage**, les pompes à chaleur (PAC) notamment aérothermiques réversibles, équipent 20 % du parc total de logements, notamment ceux chauffés à l'électricité, avec un coefficient de performance de 4 en 2030 contre 3 en moyenne aujourd'hui. Le fort taux de pénétration de cet équipement est également lié à la poursuite de la demande tendancielle en climatisation dans certaines régions. Les logements chauffés au gaz s'équipent progressivement en chaudières à condensation. Sur la fin de la période, les systèmes hybrides et de microcogénération commencent également à pénétrer le parc.

- **Pour l'eau chaude sanitaire**, les cumulus (chauffe-eau à effet joule) sont progressivement remplacés par des chauffe-eau thermodynamiques (CET) qui permettent de réduire de moitié la facture des ménages et, dans une moindre mesure, par des chauffe-eau solaires individuels (CESI). Sans évolution majeure de la filière (coûts, performances) en France, aujourd'hui non prévisible, les CESI se diffusent lentement dans le parc, leur taux de pénétration a été évalué à 10 % des logements en 2030.

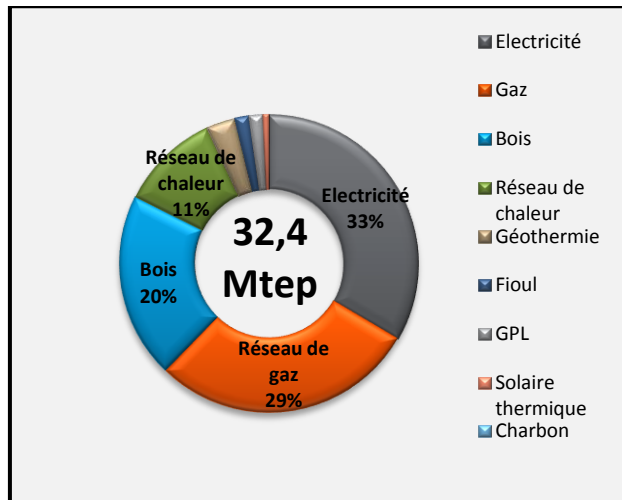
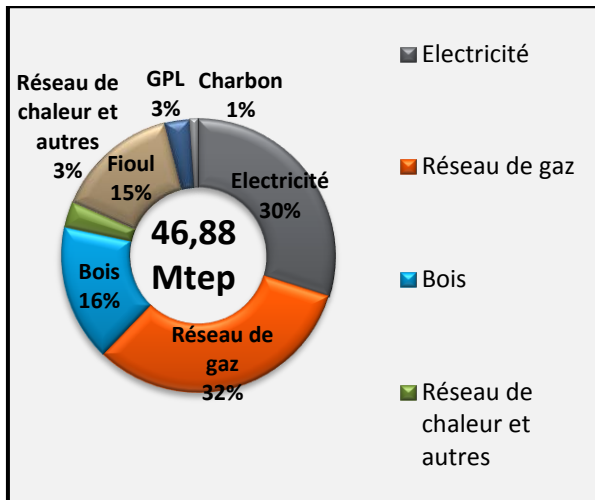
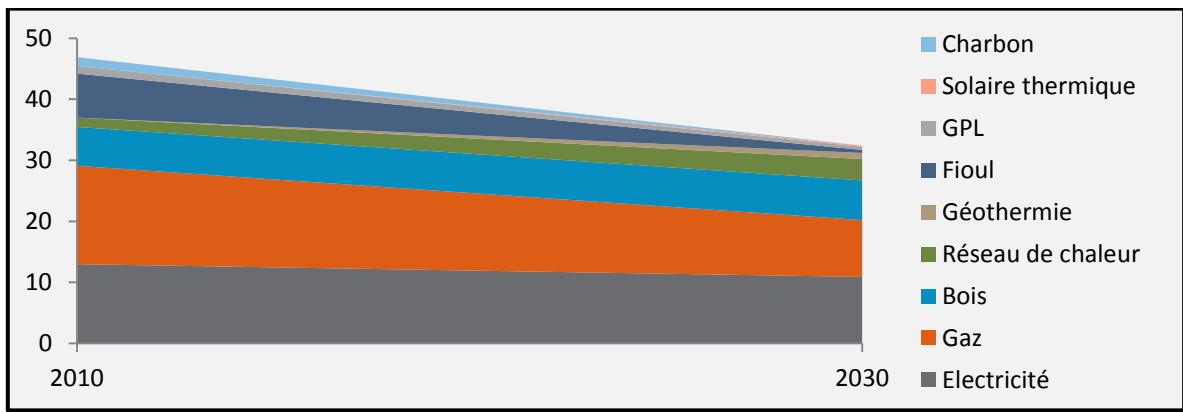
Sur les usages réglementés, la consommation énergétique passe ainsi de 240kWh_{ep}/m²/an à 130 kWh_{ep}/m²/an en 2030, soit une diminution de près de 46%

➤ Des usages spécifiques maîtrisés

Concernant les usages spécifiques de l'électricité, l'hypothèse est faite que la moyenne du parc en 2030 dispose des meilleures technologies disponibles aujourd'hui. Le taux d'équipement est pris à 1 par ménage pour chaque produit électroménager « blanc », 2 télévisions par ménage, etc. L'émergence de consommations correspondant à de nouveaux usages est également intégrée et constitue le poste de plus forte croissance pour les usages spécifiques. Au total, le progrès technique combiné à la multiplication des usages permet au mieux de tableur sur une stabilité de ce poste de consommation.



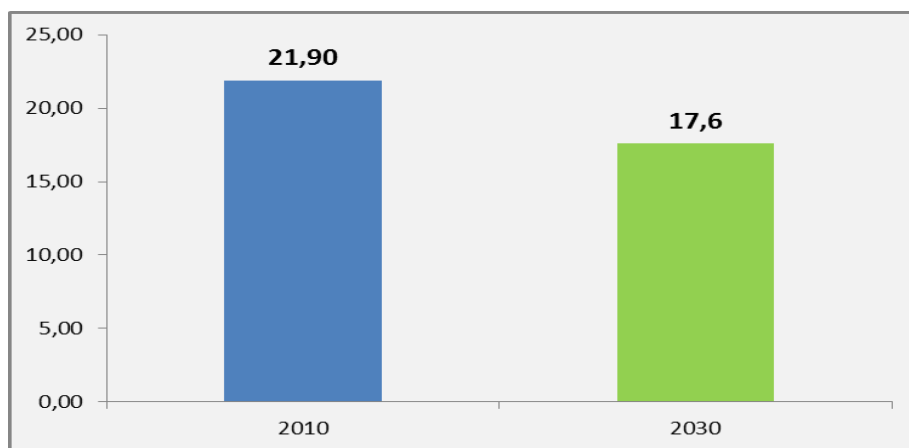
ENCADRE 2 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT RESIDENTIEL EN 2010 ET 2030, PAR USAGE



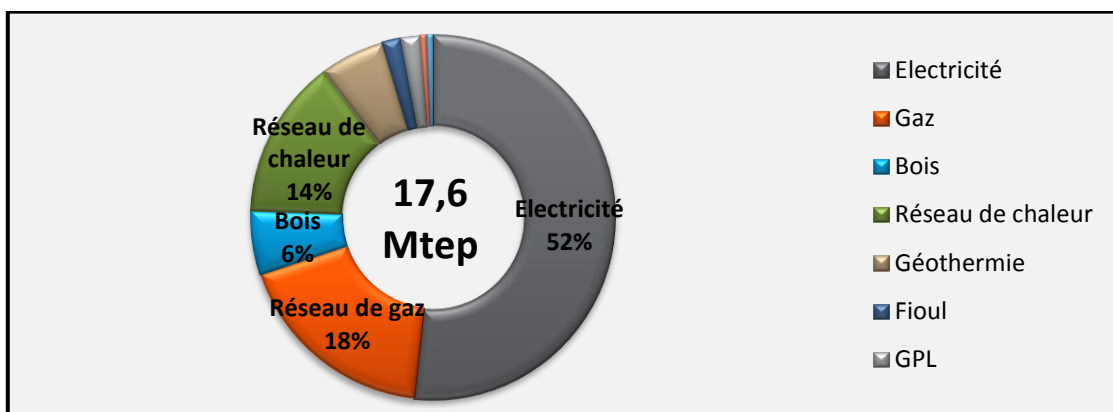
ENCADRE 3 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DANS LE RESIDENTIEL EN 2010 ET 2030, PAR VECTEUR

➤ Les bâtiments tertiaires

Les hypothèses prises sur la croissance structurelle du PIB tirent les consommations énergétiques dans le tertiaire. La croissance des surfaces est considérée comme liée à la croissance du nombre d'employés : la surface par employé est supposée constante d'ici 2030. Les surfaces climatisées progressent tandis que les besoins en chauffage diminuent par la rénovation des bâtiments. Par ailleurs, les rendements des équipements s'améliorent de la même façon que dans le scénario résidentiel.



ENCADRE 4 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DANS LE TERTIAIRE EN 2010 ET 2030 EN MTEP FINALES



ENCADRE 5 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS TERTIAIRES EN MTEP EN 2030, PAR VECTEUR

Les bâtiments à énergie positive, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires font leur apparition et permettent de développer une production décentralisée d'énergie, notamment par la production photovoltaïque en toiture. Celle-ci est chiffrée dans la partie Offre énergétique. *Mtep*

TRANSPORT ET MOBILITE

➤ Se déplacer autant, mais se déplacer différemment

Aujourd'hui, la voiture individuelle reste la règle que ce soit pour les déplacements urbains, périurbains ou de longue distance. Or même si chaque véhicule parcourt 13 000 km par an, il est inexploité 95 % du temps.

En 2030, on considère que chaque personne parcourt autant de kilomètres qu'aujourd'hui, mais différemment. Des services de mobilité - véhicules propriétés de professionnels, notamment électriques, mis à la disposition des usagers par exemple en libre service - se développent largement à partir de 2020 pour représenter 10 % des flux urbains et périurbains en 2030. Le co-voiturage continue à se développer. Une part importante du report modal se fait également sur les transports en commun et les modes doux. Ainsi, les trafics comptabilisés en véhicules-kilomètres restent stables.

Flux de voyageurs : 2010 / 2030	Urbain	Périurbain	Longue distance
Véhicules individuels	75% / 54%	84% / 61%	68% / 55%
Covoiturage, autopartage	0% / 10%	0% / 10%	0% / 5%
Transports collectifs (bus, car)	6% / 10%	7% / 10%	8% / 10%
Transports collectifs (fer)	8% / 10%	7% / 10%	25% / 30%
Vélo	4% / 10%	1% / 6%	0% / 0%
Deux-roues motorisés (service)	0 / 2%	0 / 1%	0 / 0,1%
Deux-roues motorisés	6% / 4%	1% / 2%	0% / 0,1%

Mobilité et trafics	2010	2030
Trafics (milliards de véhicules * km)	450	450

Mobilité globale (milliards de voyages * km)	711	790
---	-----	-----

ENCADRE 6 : FLUX ET TRAFICS EN 2010 ET 2030

➤ **Des véhicules mieux adaptés**

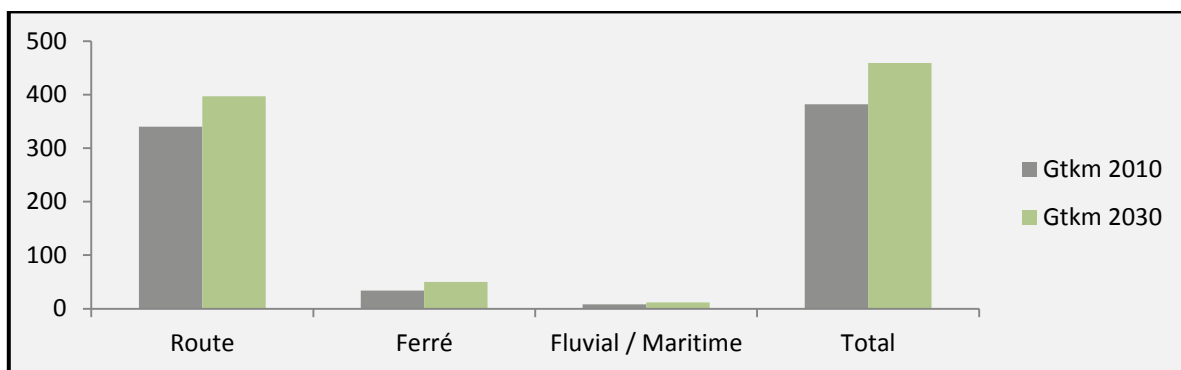
Du point de vue technologique, les motorisations thermiques continuent de s'améliorer et le parc intègre de plus en plus de véhicules hybrides non rechargeables. De nouvelles motorisations apparaissent sur le marché : principalement des véhicules hybrides rechargeables plug-in (à double motorisation et qui se rechargent sur le secteur), ainsi que des véhicules électriques surtout achetés par les professionnels et déployés par les services de mobilité. Les émissions moyennes du parc automobile passent ainsi de 130 g CO₂/km aujourd'hui à 100g/km en 2030. Alors que les véhicules neufs émettent aujourd'hui un peu moins de 130gCO₂/km en moyenne, la moyenne pondérée des véhicules neufs de 2030 émettra 49gCO₂/km (les véhicules électriques n'émettent pas de CO₂, les VHR émettent environ 30gCO₂/km, et les véhicules thermiques entre 50 et 100gCO₂/km). Les terres cultivées pour les biocarburants restent constantes tandis que la part des biocarburants de 2^{ème} génération progresse aux dépens de ceux de 1^{ère} génération (0,7Mtep de biocarburants 2^{ème} génération sur 3Mtep de biocarburants en 2030).

Véhicules (dont VP-VUL)	Ventes 2010	Ventes 2030	Parc 2010	Parc 2030
Véhicules thermiques	100%	64%	100%	89%
Véhicules hybrides rechargeables	0%	22%	0%	7%
Véhicules électriques	0%	10%	0%	4%
Total	2.2 millions 127gCO ₂ /km	2 millions 49gCO ₂ /km	35 millions 165gCO ₂ /km	35 millions 100gCO ₂ / km

ENCADRE 7 : VENTES ET PARCS DE VEHICULES

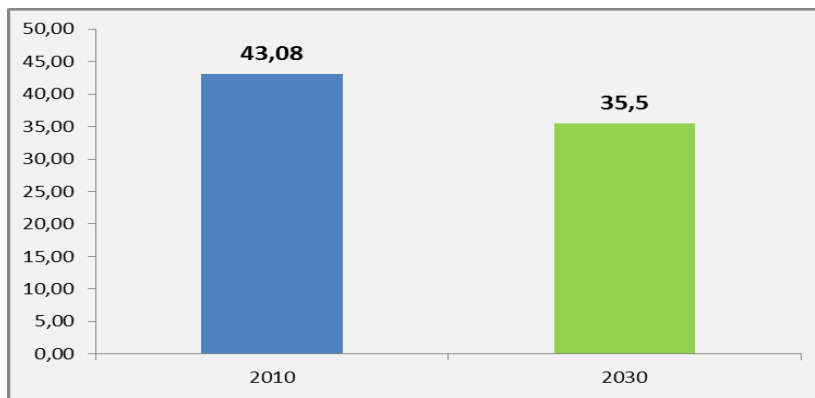
➤ **Le transport de marchandises encore fortement marqué par la route**

L'évolution du transport de marchandises est très impactée par la croissance du PIB. Même en considérant un accroissement plus lent que la tendance historiquement observée ainsi que des reports modaux importants vers le fer (qui retrouve son niveau de 1990), le fluvial et le maritime, le transport routier progresse et les besoins en transport de marchandises (en tonnes-kilomètre) continuent de croître jusqu'en 2030.

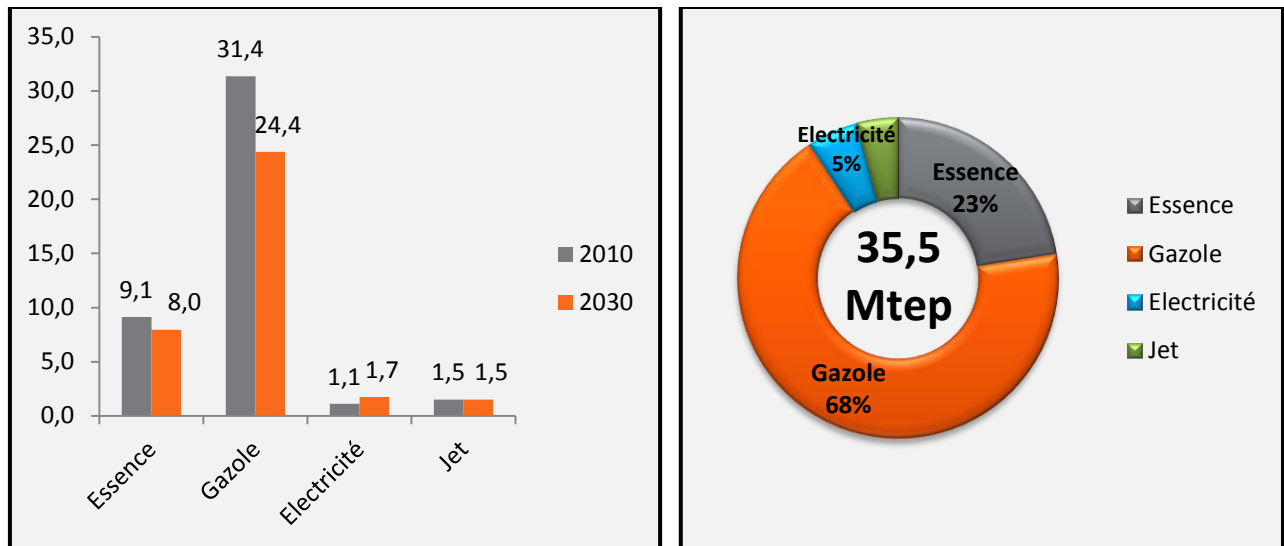


ENCADRE 8 : TRANSPORT DE MARCHANDISE EN GTKM EN 2030, PAR MODE

➤ **Bilan énergétique du secteur des transports**



ENCADRE 9 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DANS LES TRANSPORTS EN 2010 2030 EN MTEP FINALES



ENCADRE 10 : BILAN D'ENERGIE POUR LE SECTEUR DES TRANSPORTS ET DE LA MOBILITE (DONT AERIEN) EN 2030, PAR VECTEUR

ALIMENTATION, AGRICULTURE ET UTILISATION DES SOLS

Bien que peu consommateur d'énergie (moins de 3% de l'énergie finale), le secteur agricole est fortement émetteur de gaz à effet de serre (près de 18%), émissions liées principalement aux pratiques agricoles et aux cheptels.

➤ Assiette alimentaire

Le scénario 2030 ne suppose pas de changement important du régime alimentaire des Français. Une politique très ambitieuse permettrait par contre de diviser par deux les pertes alimentaires évitables. Les imports et exports de produits agricoles et denrées alimentaires ont été considérés comme stables en volume. Les tendances actuelles de baisse de consommations de viande sont prolongées.

➤ Pratiques et productions agricoles

Les pratiques agricoles évoluent progressivement avec le développement sur 10% de la SAU d'une production « intégrée » limitant l'usage des intrants, valorisant mieux les apports organiques, recourant à la simplification du travail du sol lorsque cela est possible et intégrant plus de rotations

de cultures. L'objectif du Grenelle de 20% de la SAU en agriculture biologique est atteint. Les principales évolutions portent sur :

- Une diminution de la consommation énergétique des bâtiments et des engins d'environ 30% ;
- une réduction de la consommation des engrais azotés de synthèse d'environ 20% ;
- une amélioration de l'autonomie protéique pour l'alimentation animale (baisse des imports de tourteaux de soja) liée à la réintroduction de cultures dédiées et à une baisse du cheptel d'environ 10% (conséquence de la réduction des pertes et baisse de la consommation).
- Les évolutions indiquées précédemment sur les pertes et la surconsommation permettent d'envisager une baisse de 20% du cheptel bovin, et une baisse de 11% des impacts liés au cheptel (énergie, GES). Peu d'évolutions des pratiques d'élevage sont attendues.

La consommation énergétique du secteur agricole (tracteurs, serres, bâtiments agricoles) passe au total de 3,9 Mtep en 2010 à 3 Mtep en 2030.

➤ Occupation des sols

Très peu de terres sont libérées. L'afforestation (boisement d'une surface longtemps dépourvue d'arbre) se poursuit avec une légère augmentation de 0,2 Mha en forêt entre 2010 et 2030. Le rythme actuel d'artificialisation des sols (62 000 ha/an) est divisé par deux en 2030.

INDUSTRIE ET PROCÉDES INDUSTRIELS

Après avoir fortement augmenté, la consommation d'énergie de l'industrie s'est stabilisée au milieu des années 2000. Elle a chuté en 2009 et 2010 du fait de la crise économique. Pour établir le scénario 2030, l'industrie a été décomposée en sous-secteurs (sidérurgie, métaux primaires, chimie, minéraux, industrie agro-alimentaire, équipements, etc.). La production totale considérée prend en compte les potentiels de recyclage évalués dans chaque sous-secteur.

Taux de réincorporation	2010	2030	Commentaire
Aluminium	78,3%	90,0 %	Limitation des exportations
Zinc	44,5%	60,0%	
Acier			
<i>dont filière oxygène</i>	114 kg/tonne de fonte	~150 kg/tonne de fonte	Seuil maximum : 160 kg/tonne de fonte
<i>dont filière électrique</i>	100%	100%	Uniquement constituée de ferraille
Verre creux	63,1%	70%	Limitation par le taux de collecte

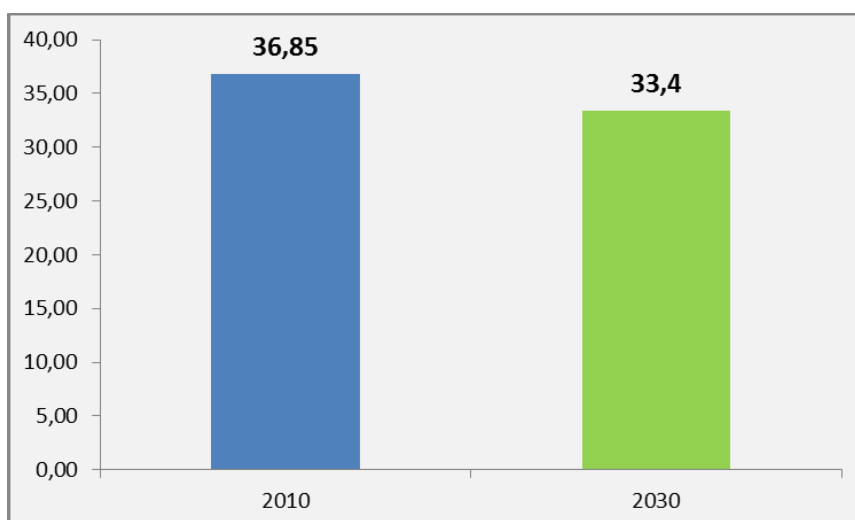
ENCADRE 11 : TAUX DE REINCORPORATION ET RECYCLAGE

Les gains possibles d'efficacité énergétique dans chacun de ces sous-secteurs ont été déclinés selon qu'ils sont dus à des technologies éprouvées (disponibles aujourd'hui et dont le temps de retour sur investissement est connu), des technologies innovantes ou des mesures organisationnelles. Les coproduits de l'industrie (chaleur fatale, valorisation énergétique des déchets, etc.) sont chiffrés dans la partie offre énergétique.

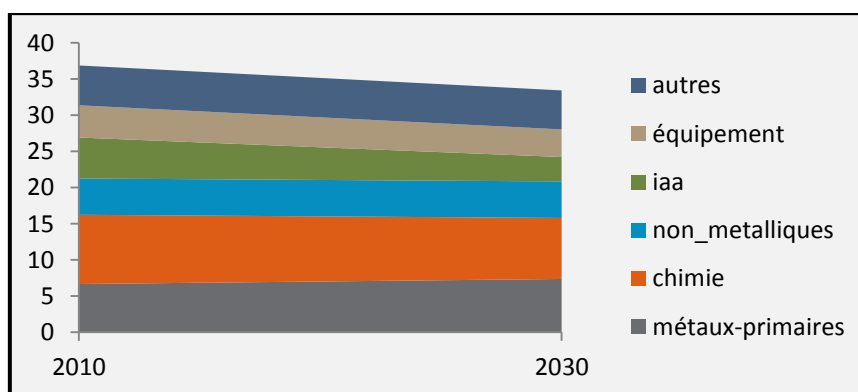
Industrie	Gains d'efficacité énergétique en 2030 par rapport à 2010 par tonne produite	Répartition par type d'EE
Sidérurgie	-7.5%	Organisationnelle : 0,7 % Innovation : 3,2%

		Eprouvée : 3,7%
Métaux primaires	-12.7%	Organisationnelle : 1.8% Innovation : 0% Eprouvée : 11.5%
Chimie	-18,0%	Organisationnelle : 2.6% Innovation : 6.5% Eprouvée : 11.2%
Minéraux non métalliques	-14.3%	Organisationnelle : 2.9% Innovation : 3.0% Eprouvée : 10%
Industrie agro-alimentaire	-29.4%	Organisationnelle : 5.5% Innovation : 5.8% Eprouvée : 20.8%
Equipement	-27.7%	Organisationnelle : 6.9% Innovation : 4.0% Eprouvée : 20.1%
Autres	-25.2%	Organisationnelle : 4.5% Innovation : 5.5% Eprouvée : 17.3%
Total	-19.6%	Gain par unité produite

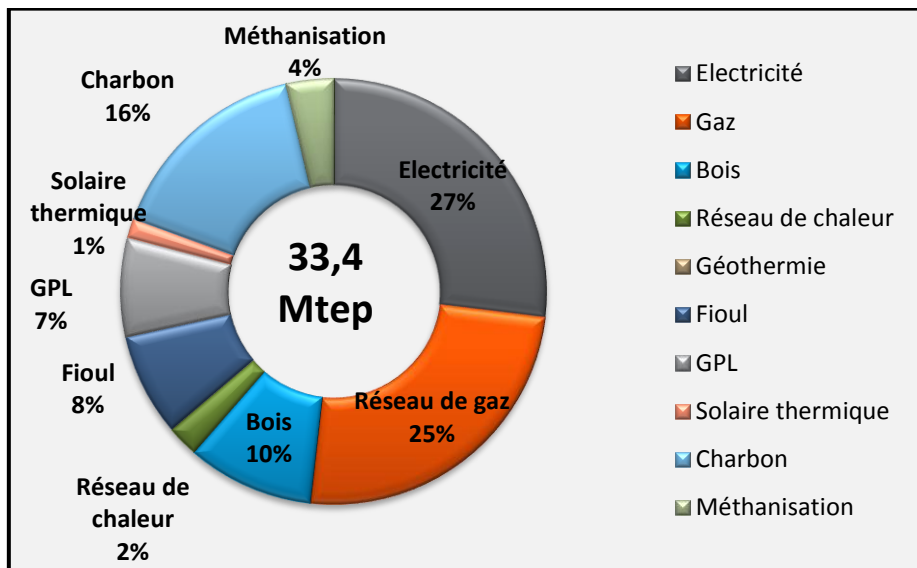
ENCADRE 12 : GAINS D'EFFICACITE ENERGETIQUE PAR SECTEUR



ENCADRE 13 : CONSOMMATION ENERGETIQUE DANS L'INDUSTRIE EN 2010 ET 2030 EN MTEP FINALES

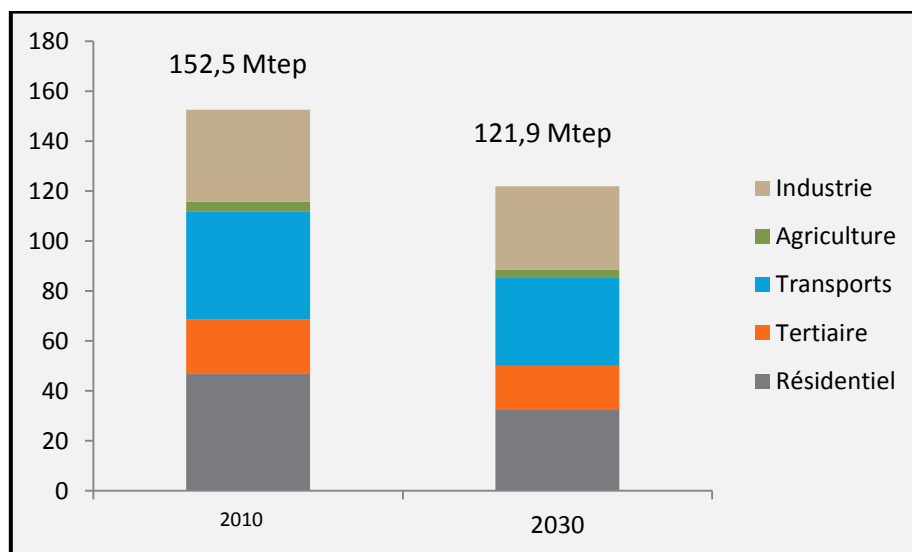


ENCADRE 14 : EVOLUTION DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES PAR TYPE D'INDUSTRIE

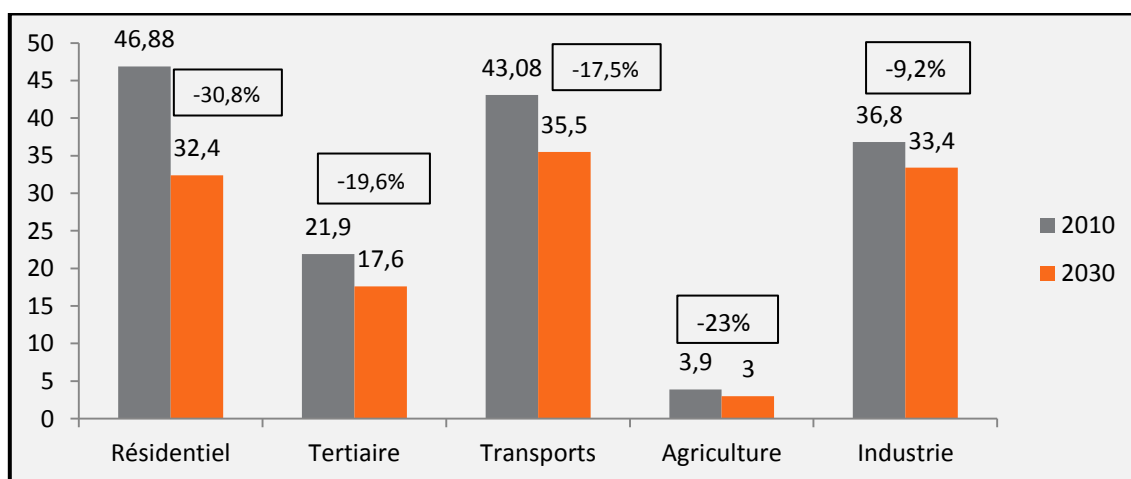


ENCADRE 15 : BILAN ENERGETIQUE DE L'INDUSTRIE, PAR VECTEUR

BILAN TOTAL DE LA DEMANDE ENERGETIQUE



ENCADRE 16 : BILAN DE LA DEMANDE ENERGETIQUE EN 2010 ET 2030, EN MTEP FINALES



ENCADRE 17 : BILAN DE LA DEMANDE ENERGETIQUE PAR SECTEUR, EN MTEP FINALES

La baisse totale de consommation d'énergie finale en 2030 par rapport à 2010 est donc de près de 29,6 Mtep. Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) contribue à cette baisse pour près de 65% (18,8Mtep), et le secteur des transports à hauteur de 25% (7,5Mtep).

PRODUCTION D'ENERGIE RENOUVELABLE

Le gisement, accessible à des conditions technico-économiques acceptables, a été évalué pour chaque énergie renouvelable en termes de production d'énergie.

1. Biomasse

Combustion : L'hypothèse est faite d'un plan de mobilisation ambitieux de la ressource forestière permettant de passer d'un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de la forêt de 48% aujourd'hui à un taux de 75% en 2030.

Le gisement total accessible pour la biomasse combustion à l'horizon 2030 est de **18Mtep** dont

- 11 Mtep issus de la forêt
- 2 Mtep de connexes de scierie
- 5 Mtep de résidus agricoles, haies et agroforesterie.

Parmi les hypothèses qui sous-tendent ces résultats figure celle d'une utilisation plus forte des ressources forestières en bois d'œuvre dans le bâtiment (construction et rénovation). C'est en effet une condition de l'exploitation de la forêt dans des conditions économiques acceptables.

Biomasse forestière	2010	2030
Accroissement naturel	115Mm ³ /an	122Mm ³ /an
Taux de prélèvement forêt	48%	75%
Biomasse-œuvre (Mm ³)	22	30
Biomasse industrie (Mm ³)	12	12
Biomasse énergie (Mm ³)	21	50 (11Mtep)
Total prélevé en Mm³	55	92

Tableau 7 : Biomasse forestière

Méthanisation : La méthanisation constitue un gisement important encore largement inexploité. En faisant l'hypothèse d'installation de 600 méthaniseurs par an (soit presque deux fois moins qu'en Allemagne), le gisement accessible est de **6 Mtep** primaire en 2030, avec environ 50% pour usage final dans le réseau de gaz, 30% pour la cogénération et 20% pour usage direct de chaleur.

2. Eolien

Le gisement mobilisable pour l'éolien terrestre à l'horizon 2030 est de **34GW** (le même niveau qu'en Allemagne aujourd'hui et un rythme d'installation d'1,5GW par an). En mer, le gisement mobilisable est de **12GW en 2030**.

3. Hydroélectricité

Le potentiel de croissance de l'hydroélectricité est aujourd'hui limité. A l'inverse, les contraintes environnementales tendent à réduire la production des installations existante, le productible reste donc globalement stable. A 2030, le potentiel de stockage d'énergie électrique est augmenté par la construction d'une petite STEP (station de transfert d'énergie par pompage) supplémentaire. La puissance délivrable par les STEP passe ainsi de 5,5GW à 7GW.

4. Photovoltaïque (PV)

Le gisement mobilisable pour le PV est de **33GW en 2030**, soit un rythme d'installation moyen de 1,55GW par an. Les centrales au sol sont uniquement exploitées sur des lieux sans conflit d'usage.

5. Energies conventionnelles

Production électrique : les moyens de production conventionnelle nécessaires sont estimés à partir de l'ajustement, au pas horaire, entre le productible ENR et la demande électrique reconstruite en 2030. La puissance installée nucléaire de 32GW en 2030, est compatible avec un point de passage à

50% de la production électrique en 2025. La puissance installée en centrales gaz est de 7GW en 2030. Des turbines à combustion sont utilisées pour l'ajustement final avec une puissance totale disponible de 7GW et des durées de production faibles. Le réseau électrique contient alors 29% d'ENR intermittentes, 19% d'ENR en base, 49% de nucléaire et 3% de CCG/TAC.

Réseau de gaz : Le gaz délivré au consommateur final est principalement fossile (18,1Mtep de gaz naturel), le reste est substitué par du biogaz issu de la méthanisation (3,7Mtep). Si l'on comptabilise la totalité du combustible circulant dans le réseau de gaz, c'est-à-dire également celui destiné à la production électrique (CCG) et au réseau de chaleur, ces chiffres sont portés à 24 et 4,8Mtep.

Carburants fossiles : le parc de véhicules voit un progressif rééquilibrage entre essence et diesel et une substitution par des biocarburants (montée en puissance de la 2^{ème} génération).

Mix énergétique 2030

En Mtep		E. Primaire	E. Finale
Combustibles solides	Charbon	5,4	5,4
	Biomasse	16,2	10,7
	Déchets	1,9	0
Combustibles liquides	Produits pétroliers	53,8	38,5
	Biocarburants	3,2	3,0
Combustibles gazeux	Réseau de gaz	0	21,8
	Gaz Naturel	24	0
	Méthanisation	6	1,2
Chaleur	Réseau de chaleur	0	6,8
	Géothermie	3,5	2,0
	Sol. Thermique	1,0	0,8
	Fatale	0,6	0
Electricité		65	31,7
		180,6	121,9

Les ENR en 2030 par vecteur

Vecteur	Mtep	Part de l'EnR dans le réseau
Réseau de gaz	22 (dont pertes 0,2)	Méthanisation : 3,7 Mtep (16,8%)
Réseau de chaleur	8	Méthanisation : 0,4 Mtep (5%) UIOM : 0,8 Mtep (10%)

	(dont pertes 1,2)	Chaleur fatale : 0,4 Mtep (5%) Biomasse : 4,3 Mtep (53,8%) Géothermie : 1 Mtep (12,5%)
Réseau électrique	38,2 (dont pertes et exports 6,5)	Eolien : 8,3 Mtep (21%) Hydroélectricité : 5,7 Mtep (15%) PV : 3,3 Mtep (8,6%) Méthanisation : 0,7 Mtep (1,7%) UIOM : 0,3 Mtep (0,8%) Bois énergie : 0,3 Mtep (0,8%) Géothermie : 0,1 Mtep (0,3%) E. marines : 0,3 Mtep (0,8%) Chaleur fatale : 0,1 Mtep (0,3%)
Direct	-	Méthanisation : 1,2 Mtep Bois énergie : 10,7 Mtep Géothermie : 2,0 Mtep Solaire thermique : 0,8 Mtep Biocarburants : 3 Mtep

ELEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

➤ Emissions de CO₂

MtCO ₂ eq	1990	2030	% 2030/1990
Consommation énergétique de l'industrie	89	52	-39,3%
Consommation énergétique du résidentiel	66	26	-59,1%
Consommation énergétique du tertiaire	30	13	-56,7%
Consommation énergétique des transports	114	105	-7,9%
Consommation énergétique de l'agriculture	9	6	-33,3%
Production d'énergie	55	20	-64%
Procédés industriels	60	40	-33%
Pratiques agricoles	89,7	70	-22%
Déchets	15	12	-20%
Divers (agriculture autres, solvants, ...)	35	30	-17%
TOTAL	563	373	-33,7%

ENCADRE 18 : EMISSIONS DE CO₂ EN 1990 ET 2030






➤ Qualité de l'air

L'évaluation de l'impact de cette prospective énergétique sur les émissions atmosphériques (polluants, précurseurs de polluants et plusieurs GES), et sur la qualité de l'air en zone fortement urbanisée est en cours, avec la participation du CEREА, du LISA et du CITEPA¹. A ce stade, des premiers résultats de sensibilité sur la qualité de l'air en 2030 dans de grandes agglomérations se dégagent vis-à-vis des émissions du trafic routier et de la combustion de biomasse.

Sur la base de l'évolution des facteurs d'émission de polluants (masses de polluants et de précurseurs émis par km parcouru ou kg de biomasse brûlée) et en tenant compte des meilleures possibilités techniques connues à ce jour, les projections d'émissions de particules PM_{2,5} et d'oxydes d'azote (NO_x) par le secteur routier, et de particules PM_{2,5} par le secteur de la combustion de biomasse conduisent à des réductions significatives de ces émissions en 2030. Les premiers tests de

¹ Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREА), Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA).

sensibilité sur la qualité de l'air dans de grandes agglomérations en 2030, réalisées à ce jour uniquement pour les émissions des transports routiers, indiquent également un effet positif (diminution des concentrations de particules PM_{2,5} et de NO_x). Cet effet est proportionnellement plus limité, compte tenu des relations non linéaires entre les émissions de polluants et de précurseurs d'une part, et la qualité de l'air d'autre part.

Résultats intermédiaires	Estimation de l'évolution des émissions entre 2010 et 2030	Test de sensibilité sur la qualité de l'air*
PM _{2,5} – Trafic routier (échappement uniquement)		
NO _x – Trafic routier		
PM _{2,5} – Combustion de Biomasse		en cours

ENCADRE 19 : EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'AIR (EN COURS)

* *L'impact effectif de ces projections volontaristes sur la qualité de l'air sera consolidé et étendu à l'ozone, sur la base des évolutions à 2030 de l'ensemble des émissions de polluants et de précurseurs par tous les secteurs émetteurs.*

Vision 2050

CADRAGE MACROECONOMIQUE ET DEMOGRAPHIQUE

Pour l'horizon 2050, les tendances prises pour le scénario 2030 ont été prolongées. L'évolution démographique retenue est à nouveau issue du scénario « fécondité haute » de l'INSEE, à savoir 74 130 000 habitants en 2050 contre 62 881 000 aujourd'hui. L'hypothèse de décroissance du nombre de personnes par ménage de l'INSEE est également retenue (2,05 personnes par ménage en 2050 contre 2,31 aujourd'hui). Un vieillissement important de la population est pris en compte. La pyramide des âges se déforme fortement avec 9 millions de personnes supplémentaires de plus de 65 ans qui représenteront ainsi un quart de la population française.

Paramètres	Valeur 2010	Valeur 2050	Unité	Source
Pétrole	78.1	231	\$ ₂₀₁₀ /baril	Prolongation tendance AIE WEO 2011
Gaz	7.5	22	\$ ₂₀₁₀ /Mtu	Prolongation tendance AIE WEO 2011
Charbon	99.2	128	\$ ₂₀₁₀ /tonne	Prolongation tendance AIE WEO 2011
Croissance structurelle du PIB	1.8%/an sur la période			Prolongation tendance CAS

ENCADRE 20 : DONNEES MACROECONOMIQUES 2050

BATIMENT ET ORGANISATION URBAINE

➤ Les spécifiés d'une approche normative

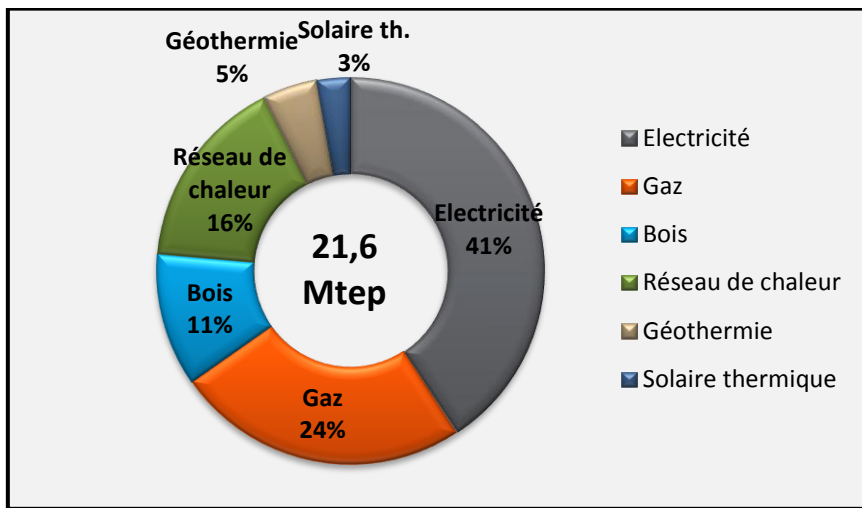
Pour 2050, le parc de logements est artificiellement divisé en deux : un parc de bâtiments neufs, de niveau BBC/BEPOS, et un parc de bâtiments rénovés. La consommation du parc de 36 000 000 de logements se répartit alors selon ces deux grandes catégories (l'unité est cette fois le kWh_{ep} afin de rendre la valeur comparable aux réglementations actuelles) :

- le parc « ancien rénové » de 27 000 000 de logements construits avant 2020, consomme en moyenne 130 kWh_{ep} par m² et par an tous usages ;
- le parc « neuf » de 9 000 000 de logements consommant en moyenne 100 kWh_{ep} par m² et par an tous usages.

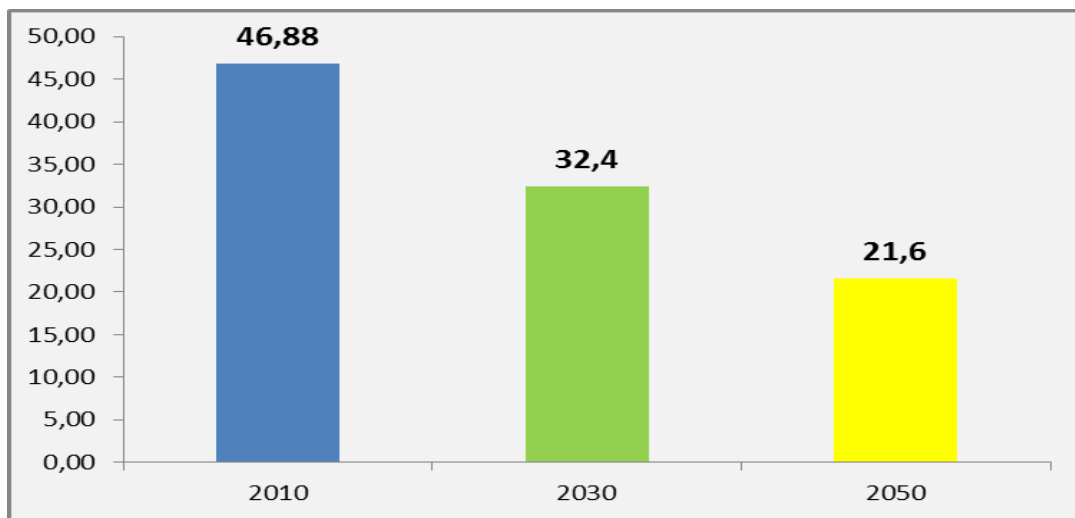
La consommation moyenne liée au chauffage et à l'eau chaude sanitaire diminue fortement grâce aux rénovations thermiques et à la pénétration importantes de PAC (50% du parc), CESI (20% du parc) et CET, les usages spécifiques de l'électricité sont globalement contenus, par contre les consommations de climatisation s'accroissent fortement.

➤ Le bâtiment résidentiel, un secteur aux gisements largement accessibles

La consommation de 130 (respectivement 100) kWh_{ep} par m² et par an se décomposerait en moyenne de la façon suivante : 80 (respectivement 50) kWh_{ep} par m² et par an pour les usages « thermiques » (chauffage, ECS, ventilation, climatisation, éclairage) et 50kWh_{ep} (soit environ 20kWh_{ef}) par m² et par an pour les usages spécifiques de l'électricité, c'est-à-dire un niveau à peu près équivalent au niveau actuel.



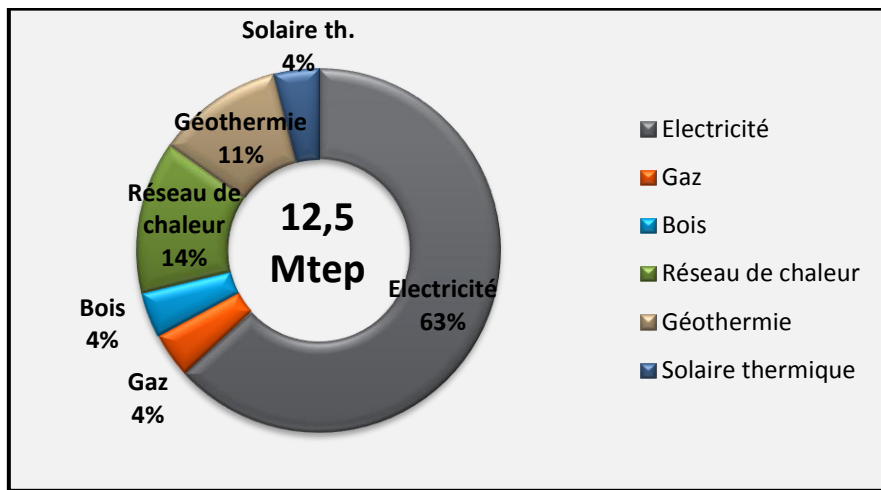
ENCADRE 21 : BILAN ENERGETIQUE DANS LE RESIDENTIEL EN 2050, PAR VECTEUR



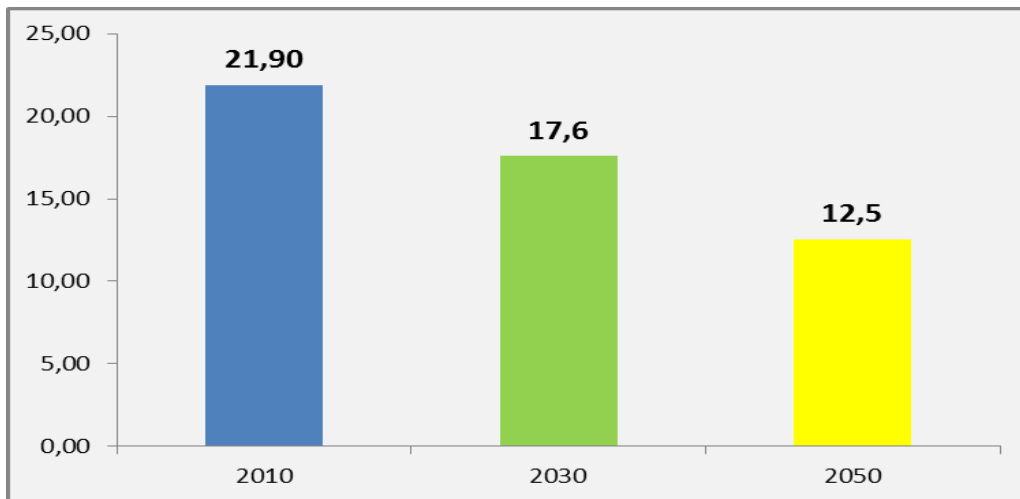
ENCADRE 22 : BILAN ENERGETIQUE DANS LE RESIDENTIEL EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES

➤ Le bâtiment tertiaire et l'évolution des types d'emploi

L'hypothèse prise pour 2050 est celle d'une diminution de 20% des surfaces par employé. En effet, le simple développement du service à la personne (notamment lié au vieillissement de la population) et une part plus importante de télétravail (notamment lié à la numérisation des échanges), ainsi que la pression sur le foncier (liée à notre hypothèse sur l'artificialisation des sols) nécessitent moins de surface tertiaire par personne qu'actuellement.



ENCADRE 23 : BILAN ENERGETIQUE DU TERTIAIRE EN 2050, PAR VECTEUR



ENCADRE 24 : BILAN ENERGETIQUE DU TERTIAIRE EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES

➤ Une organisation urbaine plus fonctionnelle

La population active travaille plus régulièrement dans les bâtiments résidentiels (ce qui, d'un point de vue « bâtiment », n'est qu'un transfert de consommation énergétique ; l'impact sur les transports est quant à lui significatif) ou dans des télécentres à proximité de leurs lieux de vie. Le déphasage entre les cycles de consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires permet d'imaginer la constitution d'îlots à énergie positive (physiques ou virtuels par smartgrids), limitant les appels sur le réseau électrique national (impact non pris en compte dans le dimensionnement du réseau électrique).

TRANSPORT ET MOBILITE

En 2050, on suppose que la mobilité par personne décroît de 20 % notamment en raison de la part accrue de télétravail, du vieillissement important de la population, ainsi que grâce à une meilleure organisation urbaine.

➤ Une mobilité plus fluide et plus efficace

En 2050, les services de mobilité représentent 30 % des flux de voyageurs ; le flux de voyageurs en transports collectifs est doublé par rapport à aujourd'hui, les transports en deux roues motorisés et vélo sont multipliés par quatre.

2010 / 2050	Urbain	Périurbain	Longue distance
Véhicules individuels	75% / 20%	84% / 39%	68% / 30%
Covoiturage, autopartage	0% / 30%	0% / 20%	0% / 15%
Transports collectifs (bus, car)	6% / 13%	7% / 12%	8% / 15%
Transports collectifs (fer)	8% / 12%	7% / 12%	23% / 40%
Vélo	4% / 15%	1% / 7%	0% / 0%
Deux-roues motorisés (service)	0% / 4%	0% / 3%	0% / 0%
Deux-roues motorisés	6% / 6%	1% / 7%	0% / 0%

ENCADRE 25 : FLUX DE VOYAGEURS EN 2050

➤ Un parc largement modifié pour une indépendance pétrolière en 2050

En 2050, pour répondre à cette mobilité, le parc serait moins important qu'aujourd'hui avec 22 millions de véhicules contre 35 millions aujourd'hui. Cette hypothèse ambitieuse suppose que la voiture n'est plus majoritairement un bien acheté par le particulier, mais aussi un mode de transport intégré dans un offre bien plus large que l'on paie pour son usage : les véhicules sont mutualisés, servent plusieurs fois dans une même journée et transportent plus de voyageurs. Ils sont aussi mieux adaptés à chaque type de trajet avec des différenciations plus fortes entre véhicules urbains et véhicules longue distance, et sont ainsi plus efficaces énergétiquement. Le parc comporterait alors 1/3 de véhicules « thermiques », 1/3 de véhicules hybrides rechargeables et 1/3 de véhicules électriques.

Véhicules (dont VP-VUL)	Ventes 2050	Parc 2050
Véhicules thermiques	34%	34%
Véhicules hybrides rechargeables	38%	38%
Véhicules électriques	28%	28%
Total	1,2 millions	22 millions

ENCADRE 26 : VENTES ET PARC DE VEHICULES EN 2050

Sur ces 22 millions de véhicules, 12 millions seraient possédés, 5 millions seraient en autopartage, et 5 millions seraient des véhicules utilitaires légers. Il est apparu au cours de nos travaux que la réduction importante des besoins en chaleur dans le secteur du bâtiment permettrait de libérer un potentiel considérable d'ENR pouvant être affecté au secteur des transports par le biais du réseau de gaz. Ainsi, les véhicules thermiques passeraient progressivement du pétrole au gaz, dont une part importante est renouvelable. Couplé au développement de la 2^{ème} voire 3^{ème} génération de biocarburants, la France pourrait alors être indépendante de la ressource pétrolière à l'horizon 2050. Cette évolution du carburant utilisé n'est toutefois pas structurante pour la réalisation du Facteur 4, les changements structurels étant liés au report modal vers l'autopartage, le transport collectif et les modes doux ainsi que la pénétration des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Si le

vecteur utilisé restait issu des produits pétroliers, les émissions moyennes du parc seraient de 49 gCO₂/km en 2050.

➤ **Une approche systémique du transport de marchandises**

Dans le scénario normatif 2050, une rupture est projetée avec un retour du trafic de marchandises en tonnes-kilomètres au niveau de 2010. Cette rupture est possible sous condition de mise en œuvre d’une politique systémique alliant des efforts importants sur la logistique, sur les emballages, et sur l’adéquation entre lieux de production et lieux de consommation. La part modale du transport ferré et du transport par voie fluviale et maritime augmente sensiblement.

Mode de transport	Gtkm 2010	Gtkm 2050
Route	340	262
Ferré	34	100
Fluvial / Maritime	8	20
Total	382	382

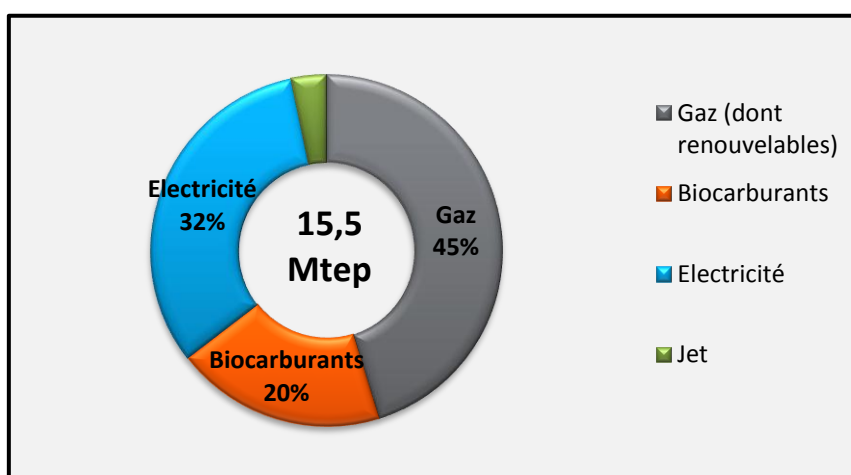
ENCADRE 27 : TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR MODE EN 2050, EN GTKM

Les poids lourds restent en dehors des villes et déposent leurs marchandises dans des centres logistiques qui les acheminent ensuite dans les centres urbains par des véhicules plus légers.

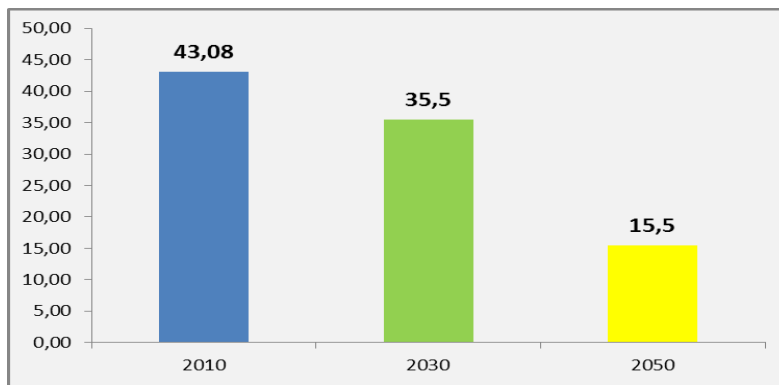
➤ **Bilan énergétique du secteur des transports**

Si nous faisons l’hypothèse que les véhicules thermiques roulent au gaz, le mix énergétiques du secteur des transports (hors aérien) est le suivant :

Energie finale – Transports	Mtep
Carburants thermiques	10
- dont réseau de gaz	7
- dont biocarburants	3
Electricité	5



ENCADRE 28 : BILAN DU SECTEUR DES TRANSPORTS (DONT AERIEN) EN 2050, PAR VECTEUR



ENCADRE 29 : BILAN DU SECTEUR DES TRANSPORTS EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES

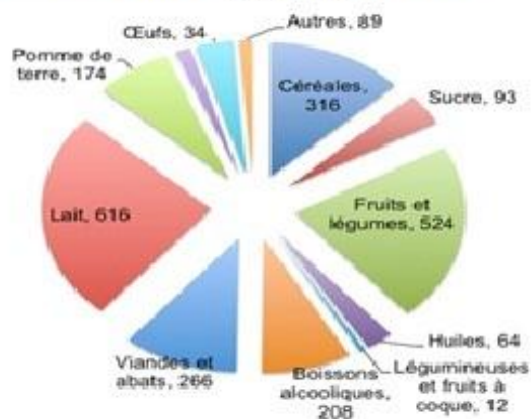
ALIMENTATION, AGRICULTURE ET UTILISATION DES SOLS

L'autonomie alimentaire de la France n'est pas recherchée. La place de la production française dans le paysage agricole européen et mondial nécessite des travaux complémentaires, le scénario actuel retenant un maintien du solde, en énergie, entre les exportations et importations.

➤ Consommation alimentaire

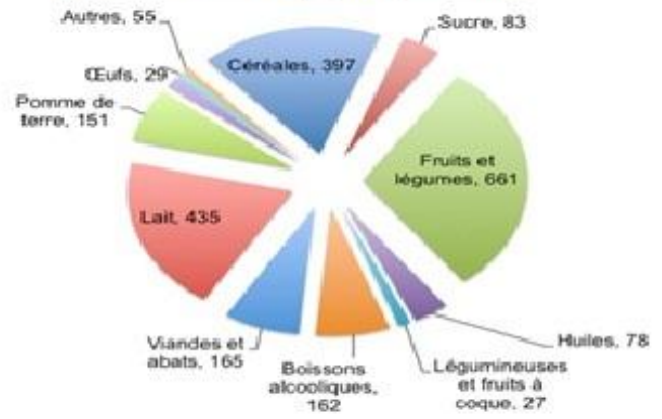
Pour 2050, l'évolution du régime alimentaire vise un rapprochement des préconisations de la FAO (Food and Agriculture Organization) sans toutefois les atteindre. Le scénario suppose notamment une réduction des surconsommations en glucides et protéines et un rééquilibrage entre protéines animales et protéines végétales. La réduction des pertes évitables atteint un plafond (-60%). Le potentiel nourricier de la ferme France est amélioré en raison de la baisse de la demande énergétique et protéique individuelle. Une baisse de la consommation de laitages de 25%, compensée par des apports calciques diversifiés, a également été retenue.

Assiette 2010 en g/jour/personne



Protéines totales : 113 g/jour/hab (dont 40 végétales)
 Energie : 3324 kcal/pers/jour
 Potentiel nourricier : 140 millions énergie / 95 millions protéines / 60 millions prot animales

Assiette 2050 en g/jour/personne



Protéines totales : 86 g/jour/hab (dont 43 végétales)
 Energie : 3270 kcal/jour/hab
 Potentiel nourricier : 136 millions énergie / 113 millions protéines / 79 millions prot animales

ENCADRE 30 : ASSIETTE ALIMENTAIRE EN 2010 ET 2050

➤ Pratiques et productions agricoles

Les systèmes de production agricoles évoluent vers des pratiques plus durables, tout en restant dans une logique de maintien d'un fort niveau de productivité. La production dite « intégrée » représente 60% de la surface agricole utile, l'agriculture biologique 30% et l'agriculture conventionnelle 10%.

Les principaux déterminants du scénario portent sur :

- une réduction significative de la consommation d'engrais minéraux azotés (-37%) par raisonnement des pratiques, allongement des rotations et développement des surfaces de légumineuses ;
- une simplification du travail du sol (gains de carburant, préservation de la qualité des sols...) ;
- une nette réduction des consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments et des serres ;
- une orientation des élevages bovins vers des systèmes herbagers favorisant le maintien des prairies permanentes et le stockage de carbone ;
- un objectif d'autonomie protéique de 75% pour l'alimentation animale ;
- une augmentation massive de la méthanisation (50% des déjections méthanisées) ;
- un développement des cultures associées (gain en biodiversité, réduction des intrants...) ;
- la systématisation des cultures intermédiaires pour préserver la qualité des sols ;
- un développement important des surfaces de haies et de l'agroforesterie (+ 1,7 Mha par rapport à 2010).

Les modèles agricoles proposés sont caractérisés par une plus forte diversité, nécessitant plus de compétences agronomiques et de technicité des agriculteurs, pour valoriser au mieux les ressources naturelles, l'équilibre des écosystèmes, et les moyens naturels de lutte contre les nuisibles.

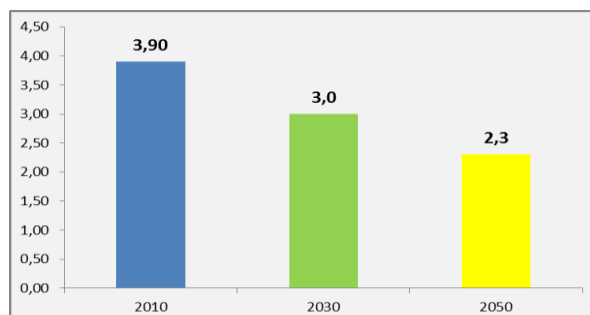
Le scénario 2050 tient compte des effets des changements climatiques (les hypothèses sont issues du projet CLIMATOR de l'INRA), et conclut à des besoins croissants en irrigation (+30 % pour atteindre un volume d'eau annuel de 4 milliards de m³), toutefois limités par rapport au scénario tendanciel.

La répartition des consommations entre les différentes viandes en 2050 est supposée identique à celle de 2010. Les cheptels pour la production de viandes blanches se maintiennent d'ici 2050. La baisse tendancielle de consommation de viande de bovins constatée ces trois dernières décennies est prolongée. Les productions de céréales, fruits et légumes augmentent.

➤ Occupation des sols

Le rythme croissant d'artificialisation des sols est supposé diminuer sous l'influence des politiques publiques dès 2015, pour atteindre un niveau d'artificialisation net nul à partir de 2030. L'afforestation se poursuit.

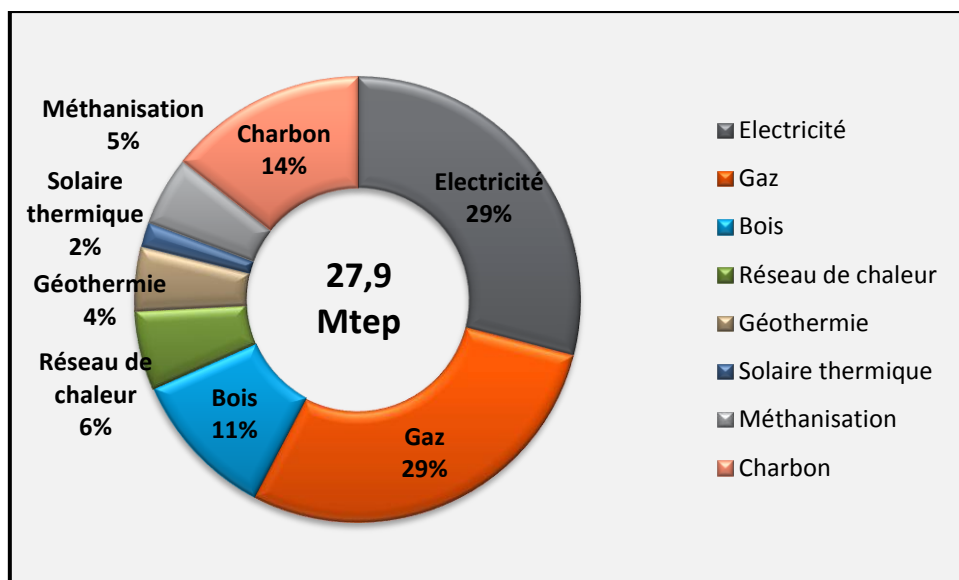
La consommation énergétique du secteur agricole passe de 3,9 Mtep en 2010 à 2,3 Mtep en 2050.



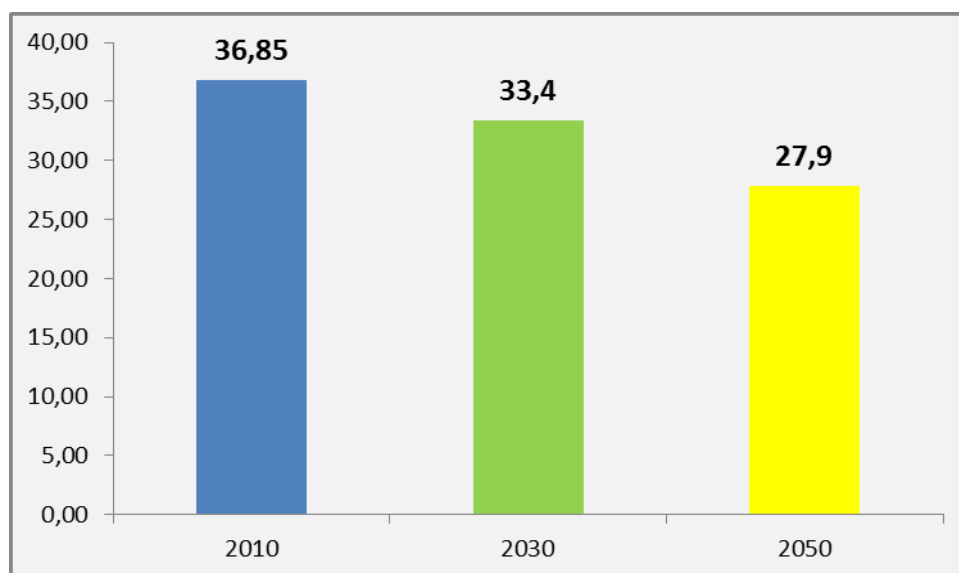
ENCADRE 31 : BILAN DU SECTEUR DE L'AGRICULTURE EN 2010, 2030 ET 2050, EN MTEP FINALES

INDUSTRIE ET PROCÉDES INDUSTRIELS

Pour 2050, l'approche retenue a été de poursuivre les évolutions de structure prises à 2030 et de reprendre les mêmes gains d'efficacité entre 2030 et 2050 qu'entre 2010 et 2030. Il s'agit d'une première approche qui devra être complétée et précisée par des travaux ultérieurs.

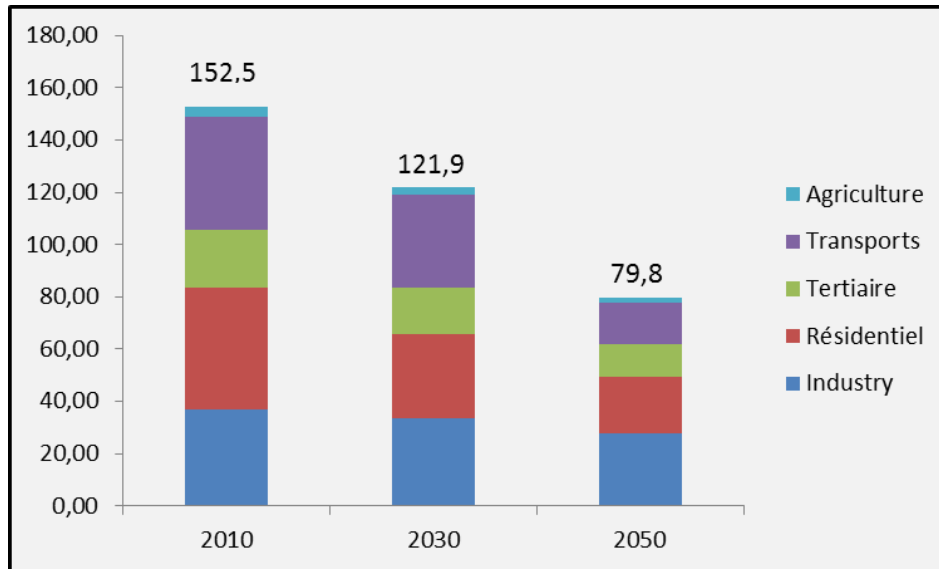


ENCADRE 32 : BILAN DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DE L'INDUSTRIE EN 2050, PAR VECTEUR

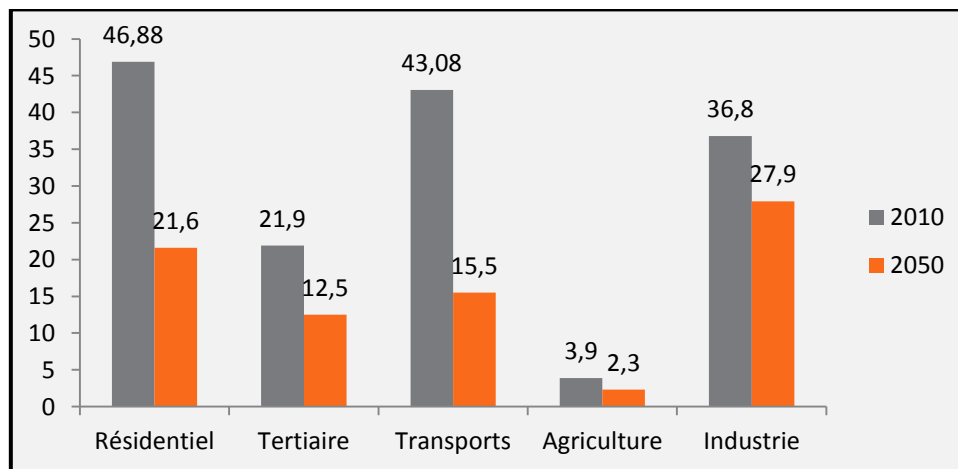


ENCADRE 33 : BILAN DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DE L'INDUSTRIE EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES

BILAN TOTAL DE LA DEMANDE ENERGETIQUE



ENCADRE 34 : BILAN ENERGETIQUE EN 2050 EN MTEP FINALES



ENCADRE 35 : BILAN DE LA DEMANDE ENERGETIQUE EN 2050, PAR SECTEUR

PRODUCTION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Le gisement, accessible à des conditions technico-économiques satisfaisantes, a été évalué pour chaque énergie renouvelable en termes de production d'énergie. Une partie du rythme annuel d'installation de nouveaux équipements est consacrée au renouvellement des équipements anciens.

1. Biomasse

Combustion : L'hypothèse est faite d'un plan de mobilisation ambitieux de la ressource forestière permettant de passer d'un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de la forêt de 48% aujourd'hui à un taux de 75% en 2050. Le gisement accessible pour la combustion est de **18 Mtep**.

Méthanisation : En faisant l'hypothèse d'installation de 550 méthaniseurs par an, le gisement accessible peut être porté à **9Mtep** en 2050 en énergie primaire.

2. Eolien

Le gisement mobilisable pour l'éolien terrestre est de **40 GW** en 2050. En mer, le gisement mobilisable est de **30 GW**.

3. PV

Le gisement mobilisable pour le PV est porté à **60 GW en 2050**.

4. Hydroélectricité

A 2050, une STEP marine est construite pour le stockage intersaisonnier.

5. Biocarburants

En 2050, le productible est relativement stable à 3,3 Mtep. La 1^{ère} génération s'est effacée, la 2^{ème} génération constitue la base de la production avec un possible complément de 3^{ème} génération non chiffré.

6. Energies conventionnelles

Réseau de gaz : le gaz circulant dans le réseau de gaz provient de différentes sources : gaz fossile, biogaz issu de la méthanisation, gaz de synthèse (« biomass to gas »), hydrogène issu de la conversion de l'électricité fatale. Si le réseau de gaz est en 2050 le vecteur le plus carboné, sa flexibilité et son rôle pour le secteur des transports est central.

Réseau de chaleur : En 2050, le réseau de chaleur permet d'acheminer de la chaleur décarbonée vers le consommateur final. Toutefois, il arrive à maturité à 6,8 Mtep d'énergie finale en raison de la baisse des besoins en chauffage et des contraintes en termes d'infrastructure.

Réseau électrique : Le mix indiqué en 2030 conviendrait pour le niveau de consommation de 2050. Si les gisements ENR indiqués pour 2050 devaient être atteints, des travaux complémentaires sur la part possible d'ENR intermittentes dans un réseau électrique devraient être menés.

Carburants fossiles : le scénario de l'ADEME permettrait de se passer de pétrole pour son usage dans les transports en 2050, ce carburant étant substitué par de l'électricité et du gaz pour les véhicules particuliers et les véhicules utilitaires léger et par des biocarburants liquides pour les poids lourds. Cette évolution nécessiterait des investissements importants en termes d'infrastructure, mais diminuerait considérablement nos importations de produits pétroliers.

Mix énergétique 2050

En Mtep		E. Primaire	E. Finale
---------	--	-------------	-----------

Combustibles solides	Charbon	4,3	4,2
	Bois	16,6	5,9
	Déchets	1	0
Combustibles liquides	Produits pétroliers	13	0,5
	Biocarb.	3,5	3,3
Combustibles gazeux	Réseau de gaz	0	21,7
	Gaz Naturel	19	0
	Biogaz	9	1,4
Chaleur	Réseau de chaleur	0	6,8
	Géoth.	6,8	3,7
	Sol. Ther.	1,8	1,6
	Fatale	1,5	0
Electricité		-	30,7
		-	79,8

Les ENR par vecteur en 2050

Vecteur	Mtep	ENR du réseau
Réseau de gaz	21.9 (dont pertes 0,2)	Biogaz : 5 Mtep (22,3%) Hydrogène fatal : 1,5 Mtep (7%) BtG : 1,5 Mtep (7%)
Réseau de chaleur	8 (dont pertes 1,2)	Méthanisation : 0,4 Mtep (5%) UIOM : 0,1 Mtep (1%) Chaleur fatale : 0,5 Mtep (6%) Bois énergie : 5,3 Mtep (66%) Géothermie : 1,5 Mtep (19%) Solaire therm. : 0,2 Mtep (2,5%)
Direct	-	Méthanisation : 1,4 Mtep Bois énergie : 5,9 Mtep Géothermie : 3,7 Mtep Solaire thermique : 1,6 Mtep Biocarburants : 3,3 Mtep

ELEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

MtCO ₂ eq	1990	2050	% 2050/1990
Consommation énergétique de l'industrie	89	30	-66,29%
Consommation énergétique du résidentiel	66	9	-86,36%
Consommation énergétique du tertiaire	30	2	-93,33%
Consommation énergétique des transports	114	11,5	-89,91%
Consommation énergétique de l'agriculture	9	2,4	-73,33%
Production d'énergie	55	10	-81,82%
Procédés industriels	60	20	-66,67%
Pratiques agricoles	89,7	45	-49,83%
Déchets	15	5	-66,67%
Divers (agriculture autres, solvants, ...)	35	15	-57,14%
TOTAL	563	150	-74%

ENCADRE 36 : EMISSIONS DE GES EN 2050

Les technologies de rupture, tout comme des technologies actuellement développées (capture, stockage et valorisation du CO₂,...) n'ont pas été prises en compte. Le stockage de carbone par les sols, non comptabilisé dans les données officielles, est positif dans le scénario de l'ADEME (contrairement à un scénario tendanciel), permettant un stockage annuel complémentaire de CO₂ de l'ordre de 30 MtCO₂.