

Philippe Charlez

L'UTOPIE DE LA CROISSANCE VERTE

LES LOIS DE LA
THERMODYNAMIQUE
SOCIALE

JACQUES-MARIE
LAFFONT

**L'UTOPIE
DE LA
CROISSANCE
VERTE**

Éditions Jacques-Marie Laffont
5, rue de Charonne, 75011 Paris

Tous droits réservés pour tous pays.
Toute reproduction de ce livre, même partielle,
par tout procédé, y compris la photocopie, est interdite.

Direction : Édouard Frison-Roche
Direction éditoriale : Katia Kaloun
Mise en pages : Charlotte Thomas

© Éditions Jacques-Marie Laffont, octobre 2021
ISBN : 978-2-49254-503-0

Philippe Charlez

Préface d'**Olivier Appert**

Ancien président du Conseil français de l'énergie

Avant-propos d'**Olivier Babeau**

Président de l'Institut Sapiens

L'UTOPIE DE LA CROISSANCE VERTE

LES LOIS DE LA THERMODYNAMIQUE SOCIALE

JACQUES-MARIE
LAFFONT

SOMMAIRE

Preface	6
Avant-propos	9

PREMIÈRE PARTIE – LA SOCIÉTÉ DE L’ÉQUIVOQUE 15

Chapitre I – Vices et vertus de la société de croissance.....	16
1. Un verrou idéologique au développement	17
2. Les trois piliers de la croissance économique	34
3. Vertus de la croissance économique	44
4. Vices de la croissance économique	56
Chapitre II – De l’origine des inégalités.....	77
1. Bases élémentaires de la thermodynamique classique	78
2. La portée profonde du concept d’entropie	85
3. Structures dissipatives et thermodynamique hors équilibre	90
4. Rupture des processus et concept de bifurcation	94
5. L’universalité de la thermodynamique	95
6. Flux d’énergie et complexité	110
7. Les leviers de réaction face à la sélection naturelle	112
Chapitre III – Les lois de la thermodynamique sociale	119
1. La chimère du marxisme « isentropique »	120
2. Échange capitaliste et démocratie libérale	130
3. Chaîne dynamique des grands modèles sociétaux	132
4. Solidarité forcée et coopération constructive	149
5. Discours sur les inégalités sociales	158
6. Modélisation de la société de croissance	170
7. Un triple écartèlement	173
Chapitre IV – De la révolution des bras à la révolution de la tête	176
1. Les clés d’une énergie de croissance	176
2. La révolution des « bras » et des « jambes »	184
3. Des « bras » à la « tête » : la révolution numérique	188
4. La bijection entre les « bras » et la « tête »	201
5. Géopolitique de la révolution numérique	206
6. Le vice et la vertu	209
Chapitre V – Le débat climatique	213
1. Le meilleur indicateur du réchauffement climatique	215
2. L’accroissement des gaz à effet de serre dans l’atmosphère	220
3. L’effet de serre et le forçage radiatif	234
4. Du climatoscepticisme à la collapsologie climatique	255
5. Le climat en équation	261

DEUXIÈME PARTIE – QUELLE CROISSANCE	
POUR QUEL MIX ÉNERGÉTIQUE ?	265
Chapitre VI – De la spirale démographique	
à la tentation décroissantiste	266
1. Les conséquences démographiques du développement humain	266
2. Transition démographique et « syndrome du pauvre »	279
3. La tentation décroissantiste	287
4. Vers une croissance soutenable et durable	306
Chapitre VII – Les limites énergétiques de la croissance	312
1. Évolution historique de l'intensité énergétique	315
2. Relation richesse-intensité énergétique – limite inférieure	316
3. Optimiser la consommation d'énergie dans l'habitat	320
4. Réduire la consommation dans les transports	331
5. Optimiser la consommation d'énergie dans l'industrie	346
6. Optimiser la production d'électricité thermique	348
7. De l'économie linéaire à l'économie circulaire	350
Chapitre VIII – Neutralité carbone, objectif 2050	354
1. De la « croissance brune » à la « croissance verte »	354
2. Des origines et de la valeur des énergies	356
3. L'obsession des agendas inversés	360
4. Les limites de la croissance verte	363
5. Vers une neutralité carbone raisonnée	396
6. De la « dictature fossile » à la « démocratie électrique »	411
7. Compensation et séquestration	420
8. Conclusion	424
Chapitre IX – Du salut nucléaire à la coopération régionale	426
1. La missive qui allait changer le cours de l'histoire	426
2. L'émergence du nucléaire civil	429
3. Évolutions technologiques de la fission nucléaire	430
4. L'opposition historique des écologistes au nucléaire	439
5. La nouvelle géopolitique du nucléaire	444
6. La fusion nucléaire et le projet ITER : chimère ou salut ?	447
7. De la nécessité d'une coopération régionale	452
8. L'Union européenne : un laboratoire mal exploité	461
Épilogue.....	473
Corriger l'indice de développement humain	473
Carte carbone et marché individuel du carbone	476
Liberté, responsabilité, coopération	478
Bibliographie.....	482

PRÉFACE

Depuis la révolution industrielle, l'énergie a permis à l'humanité de se développer à pas de géant. Pendant longtemps encore, elle sera indispensable pour accompagner la croissance économique de nombreux pays, comme nous le rappellent les projections de l'Agence internationale de l'énergie.

Toutefois, nous abordons aujourd'hui un nouveau virage. La transition énergétique est devenue au fil des années une thématique politique majeure. Malheureusement, elle se résume trop souvent à des slogans simplistes comme « Sauvons la planète ». Mais de quelle planète s'agit-il ? Une planète postmoderne retournant à des sociétés primitives, ou une planète en développement où les besoins humains doivent être optimisés ?

Résoudre cette équation complexe demande d'abord de s'interroger sur le concept de « société de croissance ». Indispensable au développement humain, la création de richesse repose sur trois piliers : un modèle politico-économique, l'innovation technologique et l'accès aux ressources naturelles. La démocratie libérale a émergé au siècle des Lumières à la suite de la révolution copernicienne. Reposant sur la libéralisation de la pensée, elle a permis de balayer les blocages idéologiques et religieux et de délivrer la parole scientifique, un prérequis indispensable aux progrès technologiques. Enfin, la croissance s'est appuyée sur la mobilisation de ressources naturelles, en particulier l'énergie.

La société de croissance a considérablement amélioré le bien-être des populations : baisse spectaculaire de la mortalité infantile et augmentation considérable de la durée de vie, accès à l'éducation et aux biens de consommation usuels... Cependant, son caractère exponentiel et son impact sur l'environnement doivent être maîtrisés. La société de croissance fonctionne comme une structure dissipative hors équilibre au sens d'Ilya Prigogine. La production de richesses requiert un flux d'énergie entrant basse entropie et produit en sortie un flux de déchets haute entropie, dont les fameux gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement climatique.

Concilier développement et protection de l'environnement demandera aux politiques futures d'être pensées dans le contexte du développement durable proposé en 1987 dans le rapport Brundtland, du nom de la Première ministre de Norvège de l'époque. Le développement durable repose sur trois piliers indissociables : l'économie, le sociétal et l'environnement. Malheureusement, les deux premières dimensions sont trop souvent sous-estimées au profit de la seule dimension environnementale : on se fixe des objectifs ambitieux sans prendre en compte les contraintes techniques, économiques ou sociétales pesant sur leur réalisation. Or, ces contraintes ne sont pas toujours compatibles, comme nous l'a montré la crise des Gilets jaunes.

Dans les débats sur la transition énergétique fleurissent alors des solutions « miracles » censées régler tous les problèmes. Certes, la technologie peut presque tout : encore faut-il que ces solutions techniques soient suffisamment matures, économiquement accessibles et sociétalement acceptables, au risque de déboucher sur une impasse. Aussi faut-il se méfier des utopies comme celle de la croissance 100 % verte ou du mythe malthusien de la décroissance. Les impacts économiques et sociétaux de telles idées aux contours flous seraient rapidement désastreux, en particulier pour les pays les moins développés.

Si l'amélioration de l'efficacité énergétique constitue une stratégie *no regrets*, elle ne suffira pas à elle seule. Il faudra aussi construire un mix énergétique durable conciliant les diverses ressources accessibles dans un contexte de développement durable.

Enfin, la transition énergétique ne pourra s'accommoder d'une somme d'égoïsmes nationalistes. Le défi est par nature mondial et nécessitera une coopération internationale. En tant que laboratoire d'idées et générateur de pistes, l'Europe y jouera un rôle moteur.

Dans ce débat complexe, où la raison et le pragmatisme doivent l'emporter sur la pensée unique, la pédagogie est indispensable. Le livre de Philippe Charlez arrive à point nommé. Expert en énergie internationalement reconnu, il présente une vision novatrice des défis de la transition énergétique. Sa grande expérience doublée d'une forte culture scientifique

et d'un grand talent pédagogique lui permettent de présenter des pistes de réflexion et d'action, ainsi que des analyses créatrices pour relever l'ensemble de ces défis.

Olivier Appert

Membre de l'Académie des technologies
Ancien président du Conseil français de l'énergie



CHAPITRE VI DE LA SPIRALE DÉMOGRAPHIQUE À LA TENTATION DÉCROISSANTISTE

« La croissance est heureuse, l'état stationnaire terne et la décroissance morose. »

Adam Smith

1. LES CONSÉQUENCES DÉMOGRAPHIQUES DU DÉVELOPPEMENT HUMAIN

1.1 Une société préindustrielle en quasi-équilibre démographique

Avant de découvrir le feu il y a environ 500 000 ans, le chasseur-cueilleur animal vivait en équilibre avec son environnement. Après avoir cueilli et chassé pour se nourrir, il devait attendre que le milieu extérieur se régénère pour recommencer l'opération. Résultat, son espérance de vie était celle que la nature lui avait octroyée : 28 ans en moyenne !

Le feu est considéré par les anthropologues¹ comme le tournant discriminant l'homme de l'animal. Pour la première fois, il puisait des ressources

1. DUREAU Alexis, « L'art de faire du feu est-il une caractéristique de l'homme ? », *Bulletins et mémoires de la société d'anthropologie de Paris*, tome 5, 1870, p. 61-86.

naturelles et rejetait dans son environnement des déchets entropiques (cendres + CO₂) en brûlant du bois. Mais, grâce à la cuisson des aliments, son espérance de vie s'accrut très vite de cinq ans. Sans le savoir, il avait déjà transformé son système thermodynamique en structure dissipative hors équilibre. Toutefois, compte tenu du nombre d'hominidés peuplant la planète à cette époque², cette première incursion hors équilibre resta, sur le plan environnemental, purement anecdotique.

En inventant l'arc et les flèches, le harpon, l'agriculture, l'élevage, la métallurgie, puis la roue bien des années plus tard, il renforça significativement le caractère hors équilibre de son système social. Ces inventions nous paraissent aujourd'hui dérisoires. Pourtant, elles demandèrent toujours davantage de ressources (du bois, du cuivre, du fer, l'humus du sol) et générèrent davantage de déchets entropiques.

Cette prospérité toute relative fournissant une alimentation plus régulière et plus saine contribua à accroître l'espérance de vie autour de 35 ans et donc, mécaniquement, la population mondiale. Dès la préhistoire, mais aussi à l'Antiquité, le développement fut donc synonyme de croissance démographique : à chaque « saut technologique » son « saut démographique ». Des sauts synonymes d'un écart croissant avec l'état d'équilibre initial des chasseurs-cueilleurs. Dans un remarquable article datant de 2003, Jean-Noël Biraben³ montre la relation limpide liant sauts technologiques et croissance démographique (*figure 1*). Il estime que, entre le début du paléolithique et l'Antiquité, la population mondiale est passée de quelques centaines de milliers à 150 millions d'individus. Entre les sauts technologiques, la population se stabilise et reste la proie facile des aléas climatiques, des épidémies et des guerres.

2. On estime en 50 000 avant J.-C. le nombre d'*Homo sapiens* à moins d'un million.

3. BIRABEN Jean-Noël, « L'évolution du nombre des hommes », *Population et Sociétés*, n° 394, octobre 2003.

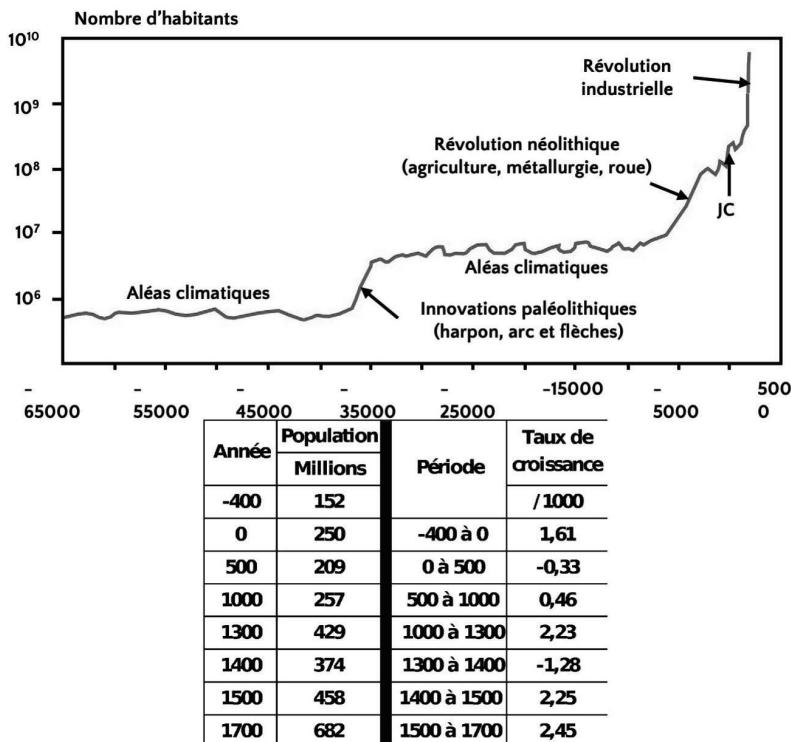


Figure 1 – Évolution de la population mondiale depuis le paléolithique. (Source : Biraben, 2003)

Cette situation évolua peu jusqu'au début du XIX^e siècle. Entre l'an zéro et le milieu du XVIII^e siècle, la population mondiale ne s'est accrue que très lentement. Compris entre un et deux pour mille, le taux de croissance marque même le pas à la fin du Moyen Âge à la suite des épidémies de peste. Et pour cause : au milieu du XVIII^e siècle, la moitié des enfants mouraient avant l'âge de 10 ans et l'espérance de vie ne dépassait pas celle des... Romains de l'Antiquité⁴. Au même titre que l'horloge technologique pratiquement figée après la découverte de la roue⁵ 3 000 ans avant J.-C., l'horloge sanitaire progressa très peu. Au milieu du XVIII^e siècle, on soignait toujours

4. KRVINE Jean-Paul, « Espérance de vie : un indicateur qui dérange », article publié le 8 août 2018 sur www.afis.org.

5. Voir chapitre I, 2.2, figure 4, p. 40.

à coups de saignées, de purges et de clystères, et la théorie des humeurs⁶ datant d’Hippocrate avait toujours pignon sur rue.

La « rupture sanitaire » vint de l’Angleterre libérale, à l’époque où James Watt perfectionnait sa machine à vapeur. Le médecin anglais Edward Jenner identifia une similarité entre la vaccine, maladie bénigne des vaches, et la variole⁷, une maladie infectieuse à laquelle le roi Louis XV avait miraculeusement survécu, mais qui décima la population européenne à plusieurs reprises. Jenner observa que les fermières en contact régulier avec le virus de la vaccine ne contractaient jamais la variole lors des épidémies. Jenner décida alors de contaminer une personne avec la vaccine via de petites incisions dans la peau, puis s’efforça sans succès d’infester son cobaye avec la variole. Jenner donna à cette opération le nom de « vaccination ». Elle connut un succès retentissant en Europe et donna lieu à l’organisation des premières grandes campagnes de vaccination antivariolique. Ce saut technologique et ceux qui suivront avec Louis et Marie Pasteur, Robert Koch ou Alexander Fleming porteront en deux siècles l’espérance de vie de l’*Homo sapiens* de 35 ans à 80 ans. Il engendra, en parallèle de la croissance économique, une « spirale démographique » tout aussi infernale : 1,5 milliard de Terriens en 1900, 2,5 milliards en 1950, 3,7 milliards en 1970, 6,1 milliards en 2000 et 7,7 milliards en 2019.

Les lois de la thermodynamique sociale se transposent d’ailleurs de façon remarquable à l’épidémiologie. Une pandémie non contrôlée conduisant à terme à l’immunité collective est une « bifurcation sociétale » amenant la société vers un nouvel état d’équilibre démographique : la peste de Justinien⁸ anéantit au vi^e siècle 25 % de la population mondiale, alors que la peste noire⁹ décima 40 % de la population européenne entre 1347 et 1351. Égalitaire, l’immunité collective est aussi source de pauvreté. Les pandémies du Moyen Âge plongèrent ainsi les sociétés de l’époque dans la misère absolue.

6. « Comment se soignait-on au Moyen Âge ? », article consultable sur www.passeportsante.net.

7. Appelée à l’époque « petite vérole ».

8. ARBI NSIRI Mohamed, « La peste de Justinien, deux siècles de pandémie dans l’Empire byzantin », article publié le 26 août 2020 sur theconversation.com.

9. VIRGILI Antoni, « Rapide et fatale : comment la peste noire a dévasté l’Europe au XIV^e siècle », article consultable sur www.nationalgeographic.fr.

Indissociable du développement, le vaccin maintient en revanche la société dans un état démographique hors équilibre. Source de richesse, il a permis d'accroître de façon significative l'espérance de vie. Mais comme toute composante hors équilibre, il est aussi source d'inégalités. Ainsi, selon l'OMS, seuls 10 % des habitants de la planète devraient avoir accès au vaccin contre la Covid-19¹⁰. L'ONG Oxfam a baptisé pour cette raison la Covid-19 « virus des inégalités¹¹ ». La vaccination est aussi source d'information, dans la mesure où elle implique de la recherche scientifique poussée sur la compréhension du virus, alors que l'immunité collective ne demande de son côté aucun effort d'analyse et de recherche.

[...]

10. ALLEMANDOU Ségolène « Vaccin contre le Covid-19 : qu'en sera-t-il des pays pauvres ? », article publié le 23 novembre 2020 sur www.france24.com.

11. « J'agis pour combattre le virus des inégalités », www.oxfamfrance.org.



CHAPITRE VII

LES LIMITES

ÉNERGÉTIQUES

DE LA CROISSANCE

« Celui qui reconnaît consciemment ses limites est le plus proche de la perfection. »

Goethe, *Sentences en prose*

Pour rester hors équilibre et produire l'énergie libre nécessaire à leur fonctionnement, toutes les structures imaginées par la nature nécessitent un flux d'énergie entrant. Ce dernier est d'autant plus important que les systèmes sont complexes.

Le corps humain n'est qu'une exceptionnelle machine thermodynamique synthétisant en miniature tous les systèmes issus des révolutions industrielle et numérique¹: des moteurs à combustion interne (les muscles), des échangeurs de chaleur et de masse (les poumons), un broyeur (les mâchoires), des réacteurs discontinu (l'estomac) et tubulaire (les intestins), un réseau de pompage (le cœur) et de circulation (les artères et les veines), un système d'épuration des eaux usées (les reins), et évidemment un ordinateur central (le cerveau). Et, à l'instar des autres systèmes, pour fonctionner, la machine humaine doit être alimentée en énergie. Est-elle pour autant une machine efficace ?

L'être humain absorbe quotidiennement en moyenne 2 500 kilocalories sous forme de nourriture^{2,3}. Plus de la moitié de ce flux est consacré au

1. QUADRI Jean-Philippe, « Premier principe bilans d'énergie », cours disponible sur webtab.ac-bordeaux.fr.

2. En supposant un poids moyen de 60 kg.

3. « Thermodynamique et métabolisme humain », cours disponible sur www.connaissancedesenergies.org.

métabolisme de base : pour l'essentiel, il consiste à maintenir notre température à 37 °C. C'est un flux de chaleur sans aucune valeur ajoutée, sinon celle de nous maintenir en vie. Et, si nous essayons de produire du travail mécanique comme penser, déplacer des objets, faire du sport ou travailler, 80 % de l'énergie supplémentaire absorbée est dissipée en sueur (donc en chaleur). Le rendement mécanique de la machine humaine se réduit donc à un petit 20 %, guère plus qu'une machine thermique, et nettement moins qu'un générateur électrique. Le maintien hors équilibre est donc source éhontée de gaspillage. Cela n'avait pas échappé à Ilya Prigogine : il avait qualifié ces structures hors équilibre de « dissipatives ».

Bien sûr, pour éviter tout excès, la nature a imaginé certains régulateurs. Ainsi, pour le corps humain, l'appel en énergie (la faim) se traduit parfois en un apport énergétique supérieur à la quantité requise (la gourmandise). Les excédents alimentaires non consommés sont alors transformés en graisses et stockés. Toutefois, en cas d'apport excessif, le métabolisme du corps humain a aussi prévu l'indigestion, un régulateur inscrit dans notre patrimoine génétique.

Mais, grâce à son patrimoine culturel et à sa capacité d'imitation hors pair⁴, l'hominidé surpassé largement son patrimoine génétique. Contrairement aux animaux qui conservent leurs écailles, leurs plumes ou leurs poils quelle que soit la saison, l'homme améliore l'efficacité de ses échanges thermiques en construisant un abri, en adaptant la quantité mais aussi la qualité de ses couches de vêtements, en augmentant ou en diminuant la température de sa chaumière.

Les sociétés humaines n'échappent pas à la règle. Pour rester hors équilibre et soutenir la croissance économique, elles ont dû y injecter en 2019 162 PWh d'énergie primaire, toutes sources confondues : un flux énergétique par unité de masse humaine quatre fois supérieur à celui absorbé par le cerveau en pleine réflexion, et tout aussi dissipatif que le corps humain ! Ainsi, toutes les machines thermiques, électriques ou numériques conçues depuis l'aube de la révolution industrielle possèdent des efficacités tout aussi médiocres que notre cœur, nos poumons ou nos intestins. Pourtant,

4. Voir chapitre II, 5.6, p. 109.

comme pour le corps humain, ce flux de gourmandise énergétique pourrait être largement optimisé, par des mesures techniques et comportementales.

Alors que depuis les Trente Glorieuses le PIB mondial s'est accru de façon exponentielle, le flux d'énergie entrant a augmenté de façon quasi linéaire⁵. Depuis 60 ans, notre société de croissance a donc largement gagné en efficacité énergétique : on fait aujourd'hui davantage de croissance avec bien moins d'énergie.

Cette efficacité, introduite dans le chapitre III (paragraphe 6) sous le vocable « intensité énergétique », se retrouve dans l'identité de Kaya (chapitre V, paragraphe 5) comme l'un des quatre leviers majeurs de la transition énergétique.

Contrairement à la notion très malthusienne d'économie, l'intensité énergétique est un indicateur sans biais, conciliant fin (créer de la richesse) et moyens (consommer de l'énergie). Ainsi peut-on réduire sa consommation journalière d'essence de deux façons. La première est de n'aller travailler qu'un jour sur deux. La seconde est de réduire d'un facteur 2 la consommation de sa voiture grâce aux progrès techniques (injection électronique, moteurs hybrides) ou via des changements de comportement (maintenir sa vitesse constante plutôt que de ralentir et d'accélérer, faire du covoiturage ou du télétravail). La première méthode est purement malthusienne (gérer la pénurie), la seconde schumpétérienne ; le rendu est très différent. Dans le premier cas, la perte de richesses (on ne travaille plus que la moitié du temps) peut être supérieure à la réduction de consommation, avec comme conséquence un accroissement d'intensité énergétique. Dans le second, comme on maintient la richesse (on continue de travailler à plein temps) tout en réduisant la consommation d'énergie, l'intensité énergétique décroît nécessairement. Optimiser l'efficacité énergétique de notre société de croissance requiert donc de réduire son intensité énergétique. Existe-t-il pour autant un seuil à cette optimisation ?

5. Voir chapitre I, figure 16, p. 63.

1. ÉVOLUTION HISTORIQUE DE L'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Depuis le début de la révolution industrielle, l'intensité énergétique mondiale a été réduite de façon considérable. Alors qu'au milieu du XIX^e siècle il fallait près de 7 kWh pour produire un dollar de richesse, en 2019 ce chiffre était tombé à 1,9 kWh. L'historique de l'intensité énergétique (figure 1) suit une courbe d'apprentissage mettant en évidence trois périodes économiques⁶. La première, durant laquelle l'intensité énergétique croît, correspond à la construction d'infrastructures lourdes (industrie, réseaux de transports, aménagement urbain). Survient ensuite une saturation, qui se manifeste par un maximum. La période de décroissance tient à plusieurs raisons : la consommation de matériaux à forte composante énergétique se stabilise, les services moins consommateurs d'énergie se développent et, grâce à la technologie, l'efficacité énergétique s'améliore. La réduction de l'intensité énergétique reflète donc à la fois les progrès technologiques, mais aussi des mutations sociétales.

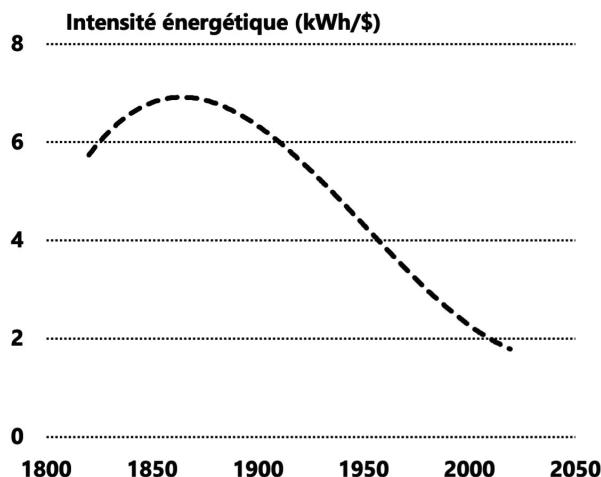


Figure 1 – Évolution de l'intensité énergétique mondiale depuis le début de la révolution industrielle. (Sources : Maddison, BP Statistical Review 2020, World Bank)

6. BAKER E., BOURNAY E., DESSUS B., REKACEWICZ P., « La transition énergétique », *Le Monde diplomatique*, janvier 2005.

Depuis les Trente Glorieuses, l'intensité énergétique mondiale s'est réduite de 35 %. Si cette baisse est à la fois spectaculaire dans les pays OCDE et non-OCDE (figure 2), la différence absolue reste toutefois très significative : l'intensité énergétique est deux fois et demie supérieure dans les pays non-OCDE. En outre, sur le plan qualitatif, une très forte différence de maturité économique est observée. Alors que les principaux pays de l'OCDE ont passé leur pic d'intensité énergétique bien avant le dernier conflit mondial, pour les pays non-OCDE, cette occurrence date des années 1980 (figure 2, droite).

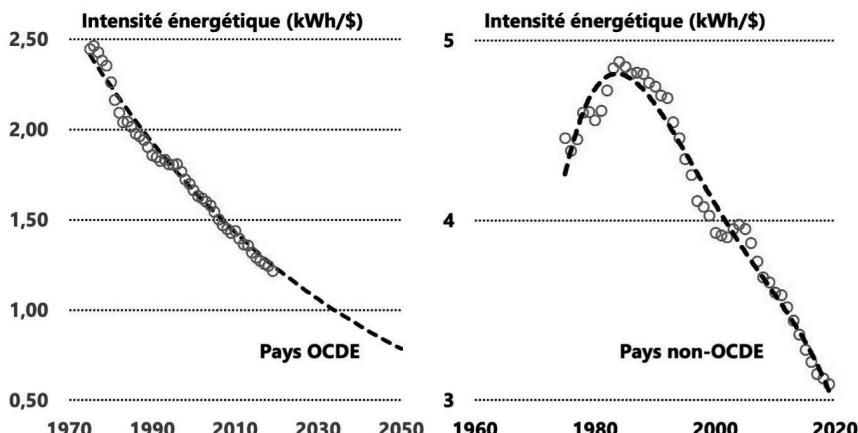


Figure 2 – Évolution mondiale de l'intensité énergétique dans les pays OCDE (gauche) et non-OCDE (droite) depuis 1970. (Sources : BP Statistical Review 2020, World Bank)

Dans les pays de l'OCDE, l'extrapolation de la courbe décroissante observée depuis 1975 (figure 2, gauche) conduirait en 2050 à une valeur d'intensité énergétique de l'ordre de 0,6 kWh/\$.

[...]



5. VERS UNE NEUTRALITÉ CARBONE RAISONNÉE

Quels leviers pour décarboner le mix énergétique français ? La consommation d'énergie finale de l'Hexagone est dédiée pour 40 % à l'habitat, pour 30 % aux transports et pour 20 % à l'industrie. Les 10% restants relèvent de la transformation pétrochimique (utilisation matérielle et non plus énergétique) du pétrole et du gaz en matières plastiques. Habitat, transports et industrie sont en conséquence les trois leviers d'usages qu'il faudra décarboner en presque totalité¹⁰³. Presque totalité car « neutralité carbone » ne veut pas dire pour autant « zéro énergie fossile ». En 2050, le mix français consommera encore une part non négligeable de pétrole et surtout de gaz naturel, notamment dans certaines industries énergétivores comme le ciment, la sidérurgie, le verre ou la chaux, dont les procédés pourront difficilement se passer de la température de la flamme fossile. Pour atteindre la neutralité carbone, ces émissions résiduelles devront être compensées¹⁰⁴.

Une transition énergétique raisonnée requiert d'abord de suivre une méthodologie pertinente. Il ne s'agit pas de prescrire la baisse des émissions comme un objectif émotionnel fixé *a priori*, mais de l'envisager comme un résultat rationnel contraint *a posteriori* par des hypothèses crédibles.

Partant de la situation actuelle¹⁰⁵, cette méthodologie vise à construire un ou plusieurs scénarios robustes : robustes sur le plan technique, en utilisant des technologies suffisamment matures déployables à l'échelle adéquate ; robustes sur le plan économique, pour rester compatible avec une croissance économique raisonnable ; robustes sur le plan sociétal, en s'appuyant sur des leviers fiscaux pertinents et une pédagogie compréhensible par tous.

103. CHARLEZ Philippe, « Une transition énergétique raisonnée pour une croissance raisonnable », article publié le 27 novembre 2020 sur www.contrepoints.org.

104. Les différentes techniques de compensation seront abordées au paragraphe 7 de ce chapitre.

105. Appelée « ligne de référence », ou *baseline* en anglais.

5.1 Décarboner l'habitat

L'habitat français toutes catégories confondues (résidentiel principal et secondaire plus tertiaire) a émis en 2018 77 millions de tonnes de CO₂. L'électricité française étant quasi décarbonée, ces émissions proviennent de trois sources principales utilisant encore massivement le fioul et le gaz : le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les plaques de cuisson.

Pour décarboner l'habitat, isoler ne suffit pas¹⁰⁶. Il est aussi indispensable de remplacer les équipements de chaleur fonctionnant au fioul ou au gaz par des équipements fonctionnant à l'électricité, voire à la biomasse. Ces équipements sont disponibles : il s'agit de pompes à chaleur, de chauffe-eau électriques ou thermodynamiques et de plaques de cuisson vitrocéramiques ou à induction.

Une nouvelle fois, il ne s'agit pas d'un enjeu technologique, mais d'un problème de taille et de coût : le projet nécessite de remplacer 2,5 milliards de m² de surface chauffée, 26,5 millions de chauffe-eau et 27,7 millions de plaques de cuisson. Mission impossible dans ce cas de mener de front une isolation thermique poussée (amener l'ensemble de l'habitat en catégories A/B/C¹⁰⁷) et une décarbonation totale.

L'objectif premier de neutralité carbone 2050 conduit donc à coupler un remplacement intégral des équipements thermiques avec une isolation raisonnable (élimination des passoires énergétiques de catégories E/F/G¹⁰⁸) permettant de soulager de façon significative la consommation d'électricité. Cette diminution de consommation passe aussi, rappelons-le, par une réduction significative du coefficient d'occupation énergétique du parc tertiaire. Il a été ramené dans nos simulations de 80 % en 2018 à 50 % en 2042¹⁰⁹.

Les résultats globaux du projet habitat (isolation E/F/G en D + remplacement de tous les équipements + réduction du taux d'occupation du tertiaire) sont présenté sur la figure 13. Il contracte la consommation annuelle

106. Voir chapitre VII, 3, p. 320.

107. Voir chapitre VII, figure 6, droite, p. 323.

108. Voir chapitre VII, figure 6, gauche, p. 323.

109. Voir chapitre VII, 3.2, p. 327.

d'énergie finale de 40 % (économie de 296 TWh) et économise sur 30 ans 1 450 Gt_{CO₂}. En 2050, le mix habitat serait alors totalement décarboné et composé de 80 % d'électricité et de 20 % de biomasse. Par rapport à 2018, la demande électrique augmenterait de 69 TWh.

Le coût et la valeur économique du projet ont été calculés en prenant en considération les mêmes données que celles utilisées dans le chapitre VII (100 €/m² de rénovation et de pompe à chaleur). Les coûts de remplacement des chauffe-eaux et des plaques de cuisson sont respectivement estimés à 450 € et 250 €. La valeur du projet a été calculée sur base d'un accroissement du prix de l'énergie « flat » de 1 % par an et d'une taxe carbone augmentant de 50 €/tonne en 2022 à 100 €/tonne en 2030¹¹⁰, puis régulièrement de 5 % par an, ce qui conduit à une valeur de 265 € à l'horizon 2050.

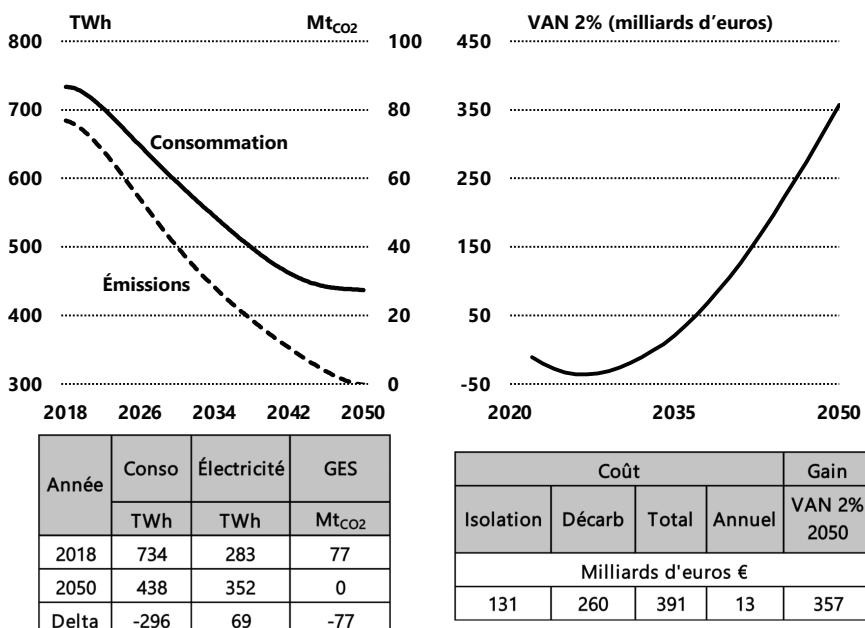


Figure 13 – Résultats globaux du projet habitat. Gauche : Économie d'énergie et réduction des émissions. Droite : Coût et valeur économique du projet.

110. En ligne avec la loi de finances 2018.

Le coût global du projet s'élève à 391 milliards d'euros (soit 13 milliards d'euros par an), dont 131 milliards d'isolation et 260 milliards de remplacement d'équipement. Le projet dégage une VAN 2 % de 357 milliards d'euros à l'horizon 2050. La VAN devient positive en 2034. Le projet global incluant l'ensemble des leviers s'avère donc beaucoup plus rentable qu'une isolation très poussée pourtant souvent considérée comme le *must* dans la plupart des agendas inversé.

5.2 Décarboner les transports

Les produits pétroliers comptaient en 2018 pour 91 % de l'énergie consommée dans les transports (figure 14). Remplacer en totalité ce maître quasi absolu à l'horizon 2050 est pour beaucoup un vœu pieux. Pour d'autres, c'est une simple question de volonté face à des lobbies pétroliers désireux de jouer leur dernière carte. Comme souvent, la réponse se trouve au milieu du gué.

Il existe aujourd'hui trois vecteurs crédibles pour porter cette décarbonation : l'électricité, l'hydrogène et les biocarburants. La question n'est pas seulement de les produire massivement ni de changer les modes de motorisation. Il s'agit d'adapter à ces « nouveaux carburants » une chaîne logistique production/approvisionnement/distribution gravitant depuis plus d'un siècle autour du pétrole. Un pétrole qui, malgré toutes ses imperfections, est si simple et si peu coûteux à extraire, à transporter, à raffiner et à distribuer. Bien que titanique, le projet n'est pas impossible, à condition d'oublier toute réaction émotionnelle, et notamment de bien différencier « courtes distances et faibles puissances » de « longues distances et fortes puissances ».

Ne « brûlant » aucun combustible, la voiture électrique a un rendement de près de 100 % contre 20 % à 30 % en moyenne pour une voiture thermique. Autrement dit, un véhicule électrique consomme 3 à 5 fois moins d'énergie qu'un véhicule thermique. En revanche, ses limitations sont aussi bien connues¹¹¹. Une faible autonomie – sauf à accroître la capacité des batteries en provoquant des émissions grises rapidement prohibitives (Figure 11) –, un long temps de charge – sauf à mailler l'ensemble du territoire avec des bornes haute puissance, au risque de rapidement dépasser

^{111.} CHARLEZ Philippe, *Croissance, énergie, climat, op. cit., chapitre 2, 3.5.3.*

les capacités du réseau électrique, notamment les jours de forte mobilité (jours de grève, « transhumances » liées aux congés). Ainsi, une borne « Autolib' » de 3 kW chargera votre batterie de 60 kWh (entre 300 km et 400 km d'autonomie) en 20 heures, une borne rapide de 40 kW en 1 h 30 et un superchargeur Tesla de 120 kW en une demi-heure. C'est toujours très long. Imaginez la file d'attente s'accumulant le long de l'autoroute A6 si un 1^{er} août chaque voiture monopolisait une pompe à essence durant 30 minutes ! Impossible dans ce cas de quitter Paris et d'espérer rejoindre les plages du Midi dans la journée. Vous risqueriez de passer une partie de vos vacances sur le parking de l'autoroute... en attendant la prise. Et pour faire le plein de votre réservoir d'électricité aussi vite que votre réservoir à essence (environ 3 minutes), il faudrait atteindre des puissances supérieures au mégawatt. Impensable pour le réseau, mais aussi pour la batterie !

Tous les paramètres (faible consommation, autonomie, temps de charge, émissions grises) convergent donc vers la même conclusion : la voiture électrique est un véhicule urbain et périurbain, et non un véhicule routier. Son application doit se restreindre à des petits véhicules de faible autonomie (batteries de 20 à 30 kWh), des parcours journaliers n'excédant pas 150 km et des longs temps de charge sur des prises de faible puissance (< 10 kW) utilisées la nuit au domicile et le jour au bureau.

Sur les 430 milliards de kilomètres parcourus par les voitures individuelles françaises en 2018, 75 % ont été dédiés à des trajets quotidiens de moins de 100 km, contre seulement 25 % pour les trajets longues distances¹¹². Malgré ses inconvénients, l'électromobilité courte distance et faible puissance jouera donc un rôle déterminant à la fois sur la réduction de la consommation et sur la décarbonation, à condition bien entendu que l'électricité qui l'alimente soit totalement décarbonée.

Cette stratégie réclamera des investissements massifs pour équiper les grandes métropoles (dans les entreprises, dans les parkings publics mais aussi dans les immeubles) de prises adéquates. Un enjeu considérable dans

112. BOTTIN Anne, « La mobilité à longue distance des Français en 2016 », Commissariat général au développement durable, ministère de la Transition écologique et solidaire, février 2018.

la mesure où la consommation urbaine et périurbaine représente la moitié de la consommation totale des voitures thermiques.

Pourtant, la politique du « tout électrique » promue par certains gouvernements encourage les motoristes à construire des voitures routières électriques et les fournisseurs d'énergie à équiper les stations autoroutières de bornes haute puissance. Cette stratégie va à l'encontre de toute logique scientifique et s'avérera, à terme, suicidaire.

Inadaptée aux voitures individuelles sur les longues distances, l'électricité l'est tout autant pour les véhicules lourds tels que les autocars, les camions, les bateaux et les avions qui cumulent longues distances et fortes puissances (> 500 CV). On retrouve sur ces véhicules une nouvelle fois l'effet d'échelle avec des tailles de batterie devenant rapidement prohibitives. Les alternatives au pétrole pour les longues distances et les fortes puissances sont donc les biocarburants et l'hydrogène.

Il y a peu de choses à rajouter par rapport à ce qui a été dit au paragraphe 4.4 sur les biocarburants, sinon qu'ils peuvent être utilisés tels quels dans les moteurs thermiques actuels. On peut aussi les mélanger avec les carburants fossiles, ce qui justifie de poursuivre la recherche sur les leviers de réduction de consommation des moteurs thermiques¹¹³. En 2019, les biocarburants représentaient 7 % de l'énergie consommée dans les transports français¹¹⁴. Pays agricole par excellence, la France est le quatrième producteur mondial après les États-Unis, le Brésil et l'Allemagne. Le développement de la filière au cours des prochaines années couplé à une réduction de la consommation devrait permettre d'en accroître significativement la proportion dans le mix transports. En complément des biocarburants liquides (éthanol et biodiesel), le biogaz issu de la méthanisation des déchets pourra aussi contribuer à la mobilité des poids lourds.

La voiture à hydrogène utilise une pile à combustible pour transformer l'hydrogène en électricité. Il s'agit donc d'une voiture électrique permettant d'emmener son électricité dans son coffre, sous forme d'hydrogène. Elle

113. Voir chapitre VII, 4.1, p. 334.

114. « Biocarburants », ministère de la Transition écologique, article mis à jour le 12 avril 2021 sur www.ecologie.gouv.fr.

pallie les insuffisances des voitures électriques à batterie sur longues distances : le plein d'hydrogène (5 kg à 700 bars) se fait à peu près aussi vite que le plein d'essence d'une voiture thermique, et ces quelques kilogrammes vous donneront 500 km d'autonomie (consommation moyenne d'un kg/100 km). Et contrairement à la batterie, l'hydrogène peut s'appliquer à tous types de véhicules, quelle que soit leur puissance : camion, bus, train, bateau et même avion. L'hydrogène présente cependant plusieurs inconvénients majeurs. Aux problèmes de sécurité relatifs aux limites d'inflammabilité, aux quantités significatives d'électricité pour le fabriquer et au coût élevé de sa fabrication, il faut rajouter la complexité et le coût du réseau de distribution. Une pompe à hydrogène coûte aujourd'hui environ un million d'euros, soit dix fois plus qu'une pompe à essence. Le maillage minimum du territoire pour les voitures individuelles nécessitera au moins 2 500 points d'approvisionnement. Aussi, la première application de l'hydrogène est sans surprise des flottes de camions, de bus ou de cars mutualisant leur réseau de distribution, voire fabriquant leur propre hydrogène vert. Telle est la stratégie du projet « Fébus », opérationnel depuis fin 2019 à Pau : des bus d'une autonomie de 240 km pouvant véhiculer 125 personnes et approvisionnés grâce à une station de production d'hydrogène vert d'une capacité de 268 kilos par jour¹¹⁵.

Électricité en ville, biocarburants et hydrogène pour les fortes puissances et les longues distances, il n'existe en théorie aucune barrière technologique pour empêcher la transition de la « mobilité brune » vers la « mobilité verte ». L'échelle de cette profonde mutation est-elle pour autant réalisable et sous quelles conditions ?

Comme pour l'habitat, la décarbonation des transports passe par le double levier de la réduction de la consommation et des changements d'équipements. Nous avions dans le chapitre VII¹¹⁶ énuméré quelques pistes à la fois techniques (réduction du poids et des frottements, introduction de la boîte de vitesse intelligente) et comportementales (réduction de la vitesse à 100 km/heure, covoiturage pour accroître le remplissage des véhicules,

115. Torregrossa Michaël, « Fébus : le bus à hydrogène est arrivé à Pau », article publié le 9 septembre 2019 sur www.h2-mobile.fr.

116. Voir chapitre VII, 4, p. 332.

encourager le télétravail, déplacer la route vers le rail à la fois pour le transport de passagers et de marchandises). Un mix transports totalement décarboné à l'horizon 2050 consistera à coupler « nouvelle sobriété » et « nouvelle mobilité verte », en prenant en compte les contraintes développées ci-dessous : électromobilité en ville pour les voitures, biocarburants et hydrogène pour la mobilité longue distance et forte puissance, biocarburants privilégiés pour les voitures et hydrogène pour les utilitaires légers et les poids lourds, compte tenu de la complexité et du coût de la distribution.

Le scénario « idéal » consistant à partager de façon parfaitement dédiée les différents segments énergétiques entre distance et puissance pourra toutefois difficilement être mis en œuvre. Aussi faut-il anticiper une certaine « hybridation » des transports, notamment au niveau des voitures individuelles. Ainsi l'hybridation « électricité et biocarburants », voire « électricité et hydrogène » permettra d'éviter le doublement du nombre de voitures (petite voiture électrique en urbain et périurbain et voiture hydrogène ou biocarburant pour les longues distances). De même, si l'hydrogène prendra dans l'avenir une place prépondérante dans la mobilité des poids lourds (incluant engins agricoles, autobus et autocars), 100 % du parc ne sera pas pour autant hydrogéné. Les biocarburants liquides mais aussi le bioGNV interviendront en complément.

Carburant	2018 - TWh				2050 - TWh				% en 2050
	Voitures	Utilitaires légers	Poids lourds	Rail	Voitures	Utilitaires légers	Poids lourds	Rail	
Pétrole	297	95	113	1	0	0	0	0	0%
Biocarburants	38	0	0	0	37	50	28	0	39%
Électricité réseau	2	0	0	8	32	0	0	17	16%
Électricité H ₂	0	0	0	0	44	38	50	0	45%
Total	338	95	113	9	114	88	78	17	100%
		554				297			

Figure 14 – Décarbonation du mix transports entre 2018 et 2050. Source : Insee & Statista¹¹⁷.

Le scénario 2050 présenté sur la figure 14 repose sur les hypothèses suivantes :

117. Le site de Statista est consultable à cette adresse : fr.statista.com.

- taux de remplissage des véhicules individuels porté à 2 grâce au covoiturage¹¹⁸ ;
- réduction de 5 % des kilomètres-passagers grâce à 75 jours de télétravail annuels¹¹⁹ ;
- déplacement de 10 % de kilomètres-passagers voiture vers le rail ;
- électricité par batteries couvrant 50 % des kilomètres parcourus par les voitures ;
- H₂ et biocarburants couvrant chacun 25 % des kilomètres parcourus par les voitures ;
- maintien du trafic utilitaires légers avec 2/3 des kilomètres biocarburants et 1/3 d'hydrogène ;
- déplacement de 15 % de tonnes-kilomètres poids lourds vers le fret ferroviaire ;
- 75 % d'hydrogène et 25 % de biocarburants (incluant le GNV) appliqué au parc de poids lourds.
- Les consommations moyennes 2050 des différents véhicules seraient alors les suivantes :
- 20 kWh/100 km pour les voitures électriques en urbain et périurbain ;
- 5 l/100 km (biocarburants) et 1 kgH₂/100 km pour les voitures ;
- 8 l/100 km (biocarburants) et 2 kgH₂/100 km pour les utilitaires légers ;
- 10 kgH₂/100 km pour les véhicules lourds¹²⁰.

Le parc de voitures individuelles 2050 serait ainsi réduit de 25 % par rapport à 2018 et se composerait de 50 % de voitures électriques et de 50 % de voitures hybrides, soit hydrogène, soit biocarburants.

Compte tenu du très haut rendement du moteur électrique et de la part prépondérante du kilométrage dédié à l'électromobilité, on assiste à une

118. Voir chapitre VII, figure 11, p. 340.

119. Voir chapitre VII, figure 12, p. 342.

120. SCHWOERER Philippe, « Des poids-lourds en cours de conversion à l'hydrogène chez e-Néo », article publié le 29 janvier 2021 sur www.h2-mobile.fr.

baisse spectaculaire de la consommation des voitures individuelles, qui passe de 338 TWh à 114 TWh. En revanche, l'ensemble du cycle hydrogène (fabrication¹²¹ + consommation dans la pile à combustible) n'étant pas plus performant que le moteur thermique, la consommation dédiée aux utilitaires légers et aux poids lourds reste quasi stationnaire. L'énergie consommée par le rail est pratiquement doublée.

Grâce à l'électromobilité et aux différentes mesures comportementales (télétravail, covoiturage, déplacement vers le rail), les transports 2050 pourraient être totalement décarbonés et leur consommation énergétique pratiquement réduite de moitié. Cette stratégie impliquerait la production de 171 TWh d'électricité supplémentaire (dont 132 TWh pour produire 2,5 millions de tonnes d'hydrogène vert), ainsi qu'un triplement de la production de biocarburants (incluant le bioGNV).

[...]

Dépôt légal : octobre 2021

Achevé d'imprimer en France par la Nouvelle Imprimerie Laballery en septembre 2021.

N° d'impression :

La Nouvelle Imprimerie Laballery est titulaire du label Imprim'Vert.