



EDITION 2019  
**BELGIUM  
ENERGY  
OUTLOOK  
2050**

---

« Rien ne sert de courir, il faut partir à point »  
Jean de La Fontaine



La **FABI** est la Fédération d'Associations Belges d'Ingénieurs Civils, d'Ingénieurs Agronomes et de Bioingénieurs. Elle compte quelques 7.000 ingénieurs membres de leur association d'Ecole. La FABI est le porte-parole pour la profession et la défense du titre d'ingénieur (Ir), auprès des instances académiques, économiques et politiques tant régionales que fédérales et internationales.

La FABI se fait entendre sur toutes les questions touchant au statut de l'ingénieur et à la reconnaissance de son diplôme. Elle veille à promouvoir le métier d'ingénieur et au respect de ses règles éthiques et déontologiques.

La mise en place de la plateforme « **Transition Énergétique** » s'inscrit dans une des missions définies par les statuts relatifs au développement des activités d'information et de formation propices au rayonnement des ingénieurs et de l'activité économique belge.

Le Conseil d'Administration de la FABI a en effet estimé nécessaire de faire entendre l'avis des ingénieurs dans le débat public sur cet important sujet avec pour objectif d'apporter les caractéristiques de chacun des éléments qui entrent en ligne de compte dans les choix menant à des visions énergétiques durables.

La FABI recueillera l'avis de tous ses membres via son site [www.fabi.be](http://www.fabi.be)

---

© 2019 – FABI – Tous droits réservés - <http://www.fabi.be>

Rue Hobbema 2  
1000 Bruxelles Belgique  
+32 2 734.75.10  
[fabi@fabi.be](mailto:fabi@fabi.be)

TABLE DES MATIERES

<b>Avant propos</b> .....	<b>4</b>
<b>Membres de la plateforme transition énergétique</b> .....	<b>6</b>
<b>Conclusions et recommandations</b> .....	<b>8</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>15</b>
<i>Le mix énergétique mondial</i> .....	<b>16</b>
<i>L'équation de Kaya et les principaux indicateurs énergétiques</i> .....	<b>20</b>
<i>Comparaison des principaux indicateurs mondiaux</i> .....	<b>21</b>
<i>Energie, économie et développement</i> .....	<b>22</b>
<b>Première partie : ligne de référence 2016</b> .....	<b>24</b>
<i>Données socio-économiques</i> .....	<b>24</b>
<i>Evolution du mix énergétique primaire</i> .....	<b>25</b>
<i>Evolution des émissions de CO<sub>2</sub></i> .....	<b>27</b>
<i>Principaux indicateurs énergétiques</i> .....	<b>28</b>
<i>la Belgique dans le contexte européen</i> .....	<b>29</b>
<i>Le mix électrique</i> .....	<b>31</b>
<i>Analyse par usage du mix énergétique final</i> .....	<b>34</b>
<i>Transports</i> .....	<b>35</b>
<i>Habitat</i> .....	<b>37</b>
<i>Industrie</i> .....	<b>41</b>
<i>Pétrochimie</i> .....	<b>44</b>
<b>Seconde partie : scénarios prospectifs 2050</b> .....	<b>46</b>
<i>Scénario 1 : « marmotte »</i> .....	<b>49</b>
<i>Transports</i> .....	<b>49</b>
<i>Habitat</i> .....	<b>53</b>
<i>Industrie</i> .....	<b>56</b>
<i>Pétrochimie</i> .....	<b>61</b>
<i>Génération électrique</i> .....	<b>61</b>
<i>Usages finaux &amp; énergie primaire</i> .....	<b>65</b>
<i>Emissions de CO<sub>2</sub></i> .....	<b>67</b>
<i>Indicateurs énergétiques</i> .....	<b>69</b>
<i>Scénario 2 : « tortue »</i> .....	<b>71</b>
<i>Transports</i> .....	<b>71</b>
<i>Habitat</i> .....	<b>76</b>
<i>Industrie</i> .....	<b>81</b>
<i>Génération électrique</i> .....	<b>82</b>
<i>Usages finaux &amp; énergie primaire</i> .....	<b>83</b>

<i>Emissions de CO<sub>2</sub></i> .....	85
<i>Indicateurs énergétiques</i> .....	86
<b>Scénario 3 : « lièvre »</b> .....	<b>88</b>
<i>Transports</i> .....	88
<i>Habitat</i> .....	92
<i>Industrie</i> .....	96
<i>Génération électrique</i> .....	96
<i>Usages finaux &amp; énergie primaire</i> .....	99
<i>Emissions de CO<sub>2</sub></i> .....	102
<i>Indicateurs énergétiques</i> .....	103
<b>Synthèse</b> .....	<b>105</b>
<b>Annexe 1 : cadre UE énergie et climat horizon 2030</b> .....	<b>112</b>
<b>Annexe 2 : innovation &amp; recherche européennes</b> .....	<b>114</b>
<b>Annexe 3 : méthodologie de calcul de l’habitat belge</b> .....	<b>115</b>
<b>Annexe 4 : transfert du transport routier vers le rail</b> .....	<b>117</b>
<b>Annexe 5 : consommation minimale des voitures</b> .....	<b>119</b>
<b>Annexe 6 : cogénération</b> .....	<b>121</b>
<b>Annexe 7 : carbon capture storage &amp; utilisation</b> .....	<b>124</b>
<b>Annexe 8 : recherche &amp; innovation</b> .....	<b>126</b>
<b>Annexe 9 : tableaux récapitulatifs</b> .....	<b>127</b>

## AVANT PROPOS

Mi-février 2019, une proposition de loi destinée à fixer des objectifs généraux pour limiter les émissions belges de CO<sub>2</sub><sup>1</sup> et se conformer à l'Accord de Paris que la Belgique a ratifié le 6 avril 2017 a été déposée au parlement. Selon un vote technique, la plupart des députés y seraient favorables<sup>2</sup>.

Et il est vrai que « *si l'UE dans son ensemble reste sur la bonne voie pour atteindre ses objectifs 2020 en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'utilisation accrue des énergies renouvelables<sup>3</sup>...la Commission pointe le manque de résultat de la Belgique dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. La Belgique est également très loin de ses ambitions en matière de renouvelable* »<sup>4</sup>

Le projet de loi climat<sup>5</sup> vise à limiter l'utilisation des énergies fossiles principale source anthropique des émissions de CO<sub>2</sub> mais aussi à sortir de l'énergie nucléaire dès 2025. Les objectifs ont été scindés en deux échéances :

- ✓ A l'horizon 2030, la cible est une réduction des émissions de 55%. Cet objectif est déjà retenu dans la résolution interparlementaire signée en décembre. Il est en ligne avec celui proposé par l'Union Européenne. Pour ce faire, l'efficacité énergétique sera améliorée d'au moins 32,5% et la part des énergies renouvelables dans le mix sera portée à 32%. Ces horizons sont en ligne avec le « *cadre UE pour l'énergie et le climat à l'horizon 2030* » (voir **Annexe 1**).
- ✓ A l'horizon 2050, la loi climat vise une réduction des émissions de 95% en portant à 100% la part d'énergies renouvelables. Ces objectifs s'alignent sur les Accords de Paris et sont cohérents avec le cadre de l'UE « *A clean planet for all* »<sup>6</sup>.

Le projet de loi mentionne toutefois que ces objectifs sont « *modifiables afin de tenir compte de l'évolution des connaissances scientifiques et techniques mais aussi des modifications du cadre international ou de l'impact socio-économique* ».

Un peu comme l'Accord de Paris qui vise à « *contenir l'augmentation de température nettement en dessous des 2°C et de poursuivre l'action pour limiter l'élévation de température à 1,5°C<sup>7</sup>* », le projet de loi climat apparaît un peu comme un « *contrat cadre sans annexes* ». Les objectifs recherchés, aussi louables soient-ils, n'intègrent pour l'instant aucun moyen technique et financier. Ils n'anticipent pas non plus les inévitables changements sociétaux que

<sup>1</sup> Par rapport au niveau de 1990

<sup>2</sup> [https://www.rtf.be/info/belgique/detail\\_plusieurs-partis-favorables-a-un-vote-de-la-loi-climat-au-parlement?id=10136567](https://www.rtf.be/info/belgique/detail_plusieurs-partis-favorables-a-un-vote-de-la-loi-climat-au-parlement?id=10136567)

<sup>3</sup> <https://www.eea.europa.eu/highlights/rising-energy-consumption-slows-eu>

<sup>4</sup> [https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/economic-and-fiscal-policy-coordination/eu-economic-governance-monitoring-prevention-correction/european-semester/european-semester-your-country/belgium/europe-2020-targets-statistics-and-indicators-belgium\\_en#energy-efficiency](https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/economic-and-fiscal-policy-coordination/eu-economic-governance-monitoring-prevention-correction/european-semester/european-semester-your-country/belgium/europe-2020-targets-statistics-and-indicators-belgium_en#energy-efficiency)

<sup>5</sup> <https://www.ecoconso.be/fr/content/quelle-loi-climat-pour-la-belgique>

<sup>6</sup> [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/paCO2/com\\_2018\\_733\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/paCO2/com_2018_733_en.pdf)

<sup>7</sup> Ces valeurs s'entendent par rapport à la révolution industrielle

cette loi, si elle était votée, impliquera. Ces objectifs sont-ils par exemple compatibles avec la société de croissance dans laquelle nous vivons depuis 70 ans ?

Acteurs essentiels de notre société, les ingénieurs sont naturellement amenés à influencer l'avenir technologique et socio-économique des peuples. En sa qualité d'organisme représentatif des ingénieurs civils et agronomes belges, la FABI a mis sur pied une « *Plateforme Transition Énergétique* » composée d'ingénieurs issus d'horizons différents. Son but est de proposer des solutions pragmatiques en essayant de concilier les objectifs environnementaux validés par les autorités belges dans des cadres européen et mondial avec un avenir prometteur pour les générations futures mais aussi avec les inévitables contraintes technologiques, économiques et sociétales. Chaque membre du groupe a pu développer ses arguments et proposer des pistes de réflexion. De la diversité des approches et des points de vue, la plate-forme a progressivement élaboré ce document. Pour prendre le maximum de distance et de hauteur, elle a voulu rester neutre et éloignée de toute posture passionnelle et revendication partisane. Le groupe a pris en compte toutes les technologies disponibles et futures qu'il jugeait crédibles à l'horizon 2050.

Ce travail a débouché sur des recommandations pratiques et rationnelles. Son originalité réside à la fois dans la pertinence de l'approche mais aussi et surtout dans sa grande flexibilité d'utilisation. Il devrait permettre aux différents organes de décision dont le « *comité climat* »<sup>8</sup> mais aussi le monde politique et la société civile d'analyser les impacts socio-économiques des hypothèses du projet de loi climat.

Ce travail doit aussi faire prendre conscience aux citoyens belges et européens de leur interdépendance énergétique. L'Union Européenne a l'ambition de développer une économie à la fois compétitive, moderne et socialement équitable. La transition énergétique apparaît comme un projet structurant demandant une coopération européenne renforcée ainsi que des investissements diversifiés nécessaires au développement de nouvelles ressources énergétiques. Ainsi, au sein du projet HORIZON 2020<sup>9</sup> (plus grand programme de recherche et d'innovation jamais réalisé par l'Union européenne) le secteur de l'énergie est financé à hauteur de 6 milliards d'euros (+1,6 milliards d'euros consacrés à la recherche nucléaire) sur la période 2014 à 2020. Au niveau belge mais aussi au niveau européen, les objectifs 2030 et 2050 ne devront pas seulement être mesurés par la diminution du CO<sub>2</sub> mais aussi par les économies qui seront réalisées en termes de réduction de la dette fortement corrélée, depuis le premier choc pétrolier, aux importations d'énergie fossiles.

Ce travail qui n'engage que ses auteurs est tout à l'honneur de la FABI. Il démontre l'implication sociétale des ingénieurs civils et des bio-ingénieurs dans ce débat essentiel qui anime l'Union Européenne et prépare l'avenir de nos sociétés.

**Michel Milecan**  
**Président de la FABI**

---

<sup>8</sup> <https://www.climat.be/fr-be/politiques/politique-belge/politique-nationale/gouvernance-climatique/>

<sup>9</sup> Voir Annexe 2

## MEMBRES DE LA PLATEFORME TRANSITION ENERGETIQUE



**Paul Bertaux** - Ingénieur AIGx -  
Directeur Projet Forêt Ressources Management Ingénierie Montpellier



**Georges Bollen** – Ingénieur AIGx – Secrétaire Général de la FABI



**Philippe Charlez** – Ingénieur AIMs – Expert en questions énergétiques -  
Institut Sapiens



**Martin Colla** – Bioingénieur AIGx – Spécialiste Environnement & ENR



**Aurore De Boom** – Bioingénieur ULB/EPBA – Conseiller Technique -  
Techno Transfer ULB



**Grégoire Léonard** - Ingénieur AILg – Chargé de cours à l'Université de  
Liège



**Bernard Mairy** - Ingénieur Civil AILouvain - Executive Director European  
Society for Engineers & Industrialists



**Michel Milecan** - Ingénieur ULB/EPBA – Président de la FABI



**Baudouin Oldenhove** – Ingénieur AILouvain – Responsable marketing Natagora



**Stéphane Palmaerts** – Ingénieur ULB/EPBA – Consultant



**Jean Snoeck** – Docteur Ingénieur AILouvain – Consultant en énergie - XRGY Consulting



**Jean Solonakis** – Ingénieur AIMs – Expert Télécommunications, électronique



**Georges Van Goethem** – Docteur Ingénieur AILouvain – Académie Royale des Sciences et d’Outremer

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Trois scénarii prospectifs horizon 2050 ont été proposés dans cette étude : **Marmotte**, **Tortue** & **Lièvre**. Les données de croissances démographique (0,3% par an constant 2050) et économique (1,5% entre 2017 et 2020 et 1,2% constant entre 2020 et 2050) sont communes aux trois scénarii. Elles conduiront en 2050 à une population de 12,5 millions d'habitants et à un PIB de 644 milliards d'euros (contre 424 milliards d'euros en 2016).

Les trois scénarii proposés par la FABI reposent sur trois hypothèses fortes que l'on peut qualifier de « raisonnables » mais qui ne sont pas nécessairement en phase avec l'agenda des autorités belges :

- Le premier scénario (**Marmotte**) suppose que la Belgique sort unilatéralement du nucléaire à l'horizon 2025. Au contraire les deux autres scénarii étalent la sortie partielle (**Tortue**) ou totale (**Lièvre**) du nucléaire sur la période 2020 à 2050.

- Compte tenu des technologies de stockage aujourd'hui disponibles (batteries, hydrogène pour l'essentiel) et de la difficulté de les mettre massivement en œuvre, **Marmotte** et **Tortue** supposent que la part de production électrique renouvelable dans le mix électrique ne dépasse pas 30% durant la période envisagée. **Lièvre** accroît cette part jusque 50% ce qui suppose implicitement d'importantes capacités de stockage.

- Compte tenu qu'aucun site n'est aujourd'hui identifié sur le sol belge, la possibilité d'injecter des quantités significatives de CO<sub>2</sub> dans le sous-sol (Carbon Capture Storage – CCS) n'a pas été envisagée dans cette étude (voir **Annexe 7**).

En fonction de l'évolution technologique, ces hypothèses pourront être revues dans les versions futures du **FABI Energy Outlook**.

### Marmotte

Ce premier scénario prolonge sans modification majeure l'évolution du mix énergétique actuel dans une démarche « *business as usual* ».

- ✓ Le nombre de véhicules croît en suivant la tendance observée depuis 2000
- ✓ Le kilométrage des véhicules diminue en suivant la tendance observée depuis 2000
- ✓ 10% de voitures électriques et 10% d'utilitaires au gaz sont introduits dans le parc
- ✓ La réduction des passagers\*km et des tonnes\*km est transférée vers le rail
- ✓ La consommation des voitures thermiques passe de 6 l/100 km à 5 l/100km
- ✓ Pas de véhicules hydrogène introduits dans le mix transport
- ✓ Pas de rénovation de l'habitat ancien
- ✓ Nouveaux logements aux normes 2012 (catégorie A) avec Pompe à Chaleur (PAC)



- ✓ Prolongement de la tendance baissière de la consommation d'énergie dans l'industrie
- ✓ Poursuite de la croissance de la consommation dans la pétrochimie
- ✓ Sortie en 2025 du nucléaire conformément à la loi 2003
- ✓ Remplacement de la génération nucléaire par du gaz à cycle combiné
- ✓ 30% de production d'électricité renouvelable en 2030

### Tortue

Le second scénario repose sur un changement profond du mix énergétique belge. Il s'appuie davantage sur la technologie que sur un bouleversement des comportements individuels.

- ✓ Le nombre de véhicules reste constant
- ✓ Le kilométrage moyen des véhicules se contracte
- ✓ Introduction du rail (identique à **Marmotte**) et du covoiturage
- ✓ 25% de voitures électriques et 40% d'utilitaires au gaz sont introduits dans le parc
- ✓ La consommation des voitures thermiques passe de 6 l/100 km à 4 l/100km
- ✓ Nombre marginal de véhicules gaz et hydrogène introduits dans le mix transport
- ✓ L'habitat ancien est rénové au rythme de 108 000 logements/an
- ✓ Nouveaux logements construits aux normes 2012 (catégorie A) avec PAC
- ✓ 20% de cogénération provenant des nouvelles centrales à gaz dans l'industrie
- ✓ Industrie pétrochimique identique à **Marmotte**
- ✓ 2 GW nucléaires retirés en 2035 et remplacés par du gaz CC
- ✓ 30% de production d'électricité renouvelable en 2030

### Lièvre

Scénario le plus avancé, il superpose aux changements technologiques des changements sociétaux significatifs.

- ✓ Le nombre de véhicules décroît au rythme de 0,7% par an
- ✓ Le kilométrage moyen des véhicules se contracte (identique à **Tortue**)
- ✓ La réduction de km (km\*passagers, km\*tonnes) est transférée en partie vers le rail
- ✓ Le covoiturage augmente de 1,56 à 2 personnes par véhicule
- ✓ Introduction du télétravail et du coworking un jour par semaine
- ✓ En matière de transport on introduit 25% de voitures électriques et 40% d'utilitaires au gaz
- ✓ Réduction de la vitesse sur autoroute de 120 km/heure à 100 km/heure
- ✓ La consommation des voitures thermiques diminue à 3 litres /100 km
- ✓ 5% de véhicules gaz naturel et hydrogène sont introduits dans le mix transport
- ✓ L'habitat est rénové au rythme moyen de 150 000 logements/an
- ✓ Nouveaux logements construits aux normes 2012 (catégorie A) avec PAC
- ✓ 20% de cogénération des nouvelles centrales à gaz sont injectés dans l'industrie
- ✓ Pétrochimie identique à **Marmotte**

- ✓ Sortie totale du nucléaire à l'horizon 2050 en trois tranches successives
- ✓ 30% de production d'électricité renouvelable en 2030 et 50% en 2040

En termes de réduction de CO<sub>2</sub>, les trois scénarios envisagés dans cette étude peuvent se résumer de la façon suivante :

- (1) avec **Marmotte** les émissions de CO<sub>2</sub> seraient toujours de 83 Mt<sub>CO2</sub>/an à l'horizon 2050 soit un déclin de 30% par rapport à 1990 (121 Mt<sub>CO2</sub>/an)
- (2) **Tortue** permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à 43 Mt<sub>CO2</sub>/an soit une diminution de 64% par rapport à 1990
- (3) malgré une quasi sortie du pétrole (hors pétrochimie), **Lièvre** fait à peine mieux : 40 Mt<sub>CO2</sub>/an soit 67% de réduction relative par rapport à 1990.

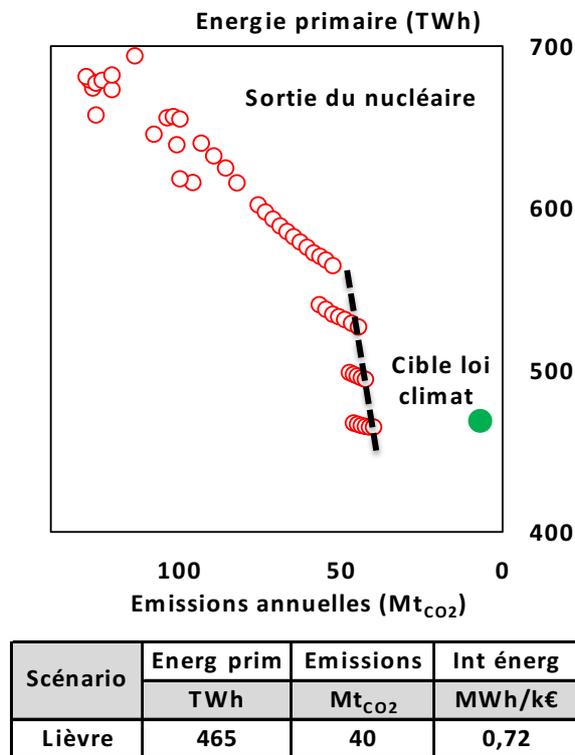
NB : toutefois, en maintenant dans le mix 2050 les 6 GW de nucléaire, les émissions le **Lièvre** sont alors réduites à 28 Mt<sub>CO2</sub>/an soit une réduction globale de 75% par rapport à 1991 (voir page suivante)

Dans la mesure où les trois scénarii ne considèrent que des technologies matures, des changements comportementaux limités et une mise en œuvre raisonnable des énergies renouvelables, **sans rupture technologique ni sociétale, une réduction des émissions de l'ordre de 60% paraît donc accessible.**

Par contre, **aucun des trois scénarii n'atteint la cible de réduction de 95%** des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050.

L'objectif des 95% est-il atteignable et à quelles conditions ? Pour ce faire il est indispensable de regarder plus en détails les conséquences de la sortie du nucléaire et de son déplacement vers le gaz.

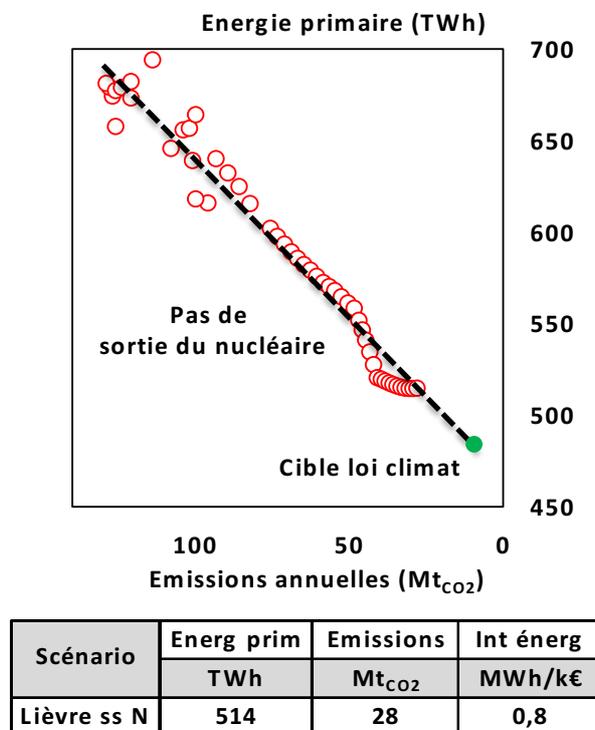
Si le remplacement du gaz à cycles combinés (+cogénération) conduit à une forte amélioration de l'efficacité énergétique et donc à une réduction très significative de la consommation d'énergie primaire, il « *bloque* » par contre la capacité du nouveau mix belge à poursuivre sa décarbonation (**Figure 1**). Ce résultat est logique dans la mesure où, hormis la génération électrique (dont la part du gaz a fortement augmenté), les transports et l'habitat ont été presque totalement décarbonés à l'horizon 2050. Le seul usage encore carboné est l'industrie pour qui les leviers de déplacement sont aujourd'hui limités. Rajouter par exemple des voitures électriques ou des pompes à chaleur ne contribue plus à réduire les émissions puisqu'elles utilisent alors de l'électricité majoritairement gazière et ce malgré un accroissement significatif des renouvelables qui représentent en 2050 la moitié de la production d'électricité.



**Figure 1 – Poursuite de la décarbonation au-delà du scénario *Lièvre* avec sortie du nucléaire**

On pourrait bien entendu pousser encore plus loin la part des renouvelables dans le mix électrique belge avec le support du gaz en cas d’intermittence. Cela a bien évidemment l’inconvénient d’un double investissement renouvelables/gaz CC avec une augmentation assez vertigineuse des puissances installées. Ainsi, en lissage annuel et tenant compte des taux de charge moyens du solaire et de l’éolien, 60% de production renouvelable demanderait au moins 45 GW de puissance ENR (soient 22 500 éoliennes équivalentes de 2MW) et au moins 3 GW de cycles combinés supplémentaires à rajouter aux 4 GW existants de sorte que le gaz puisse suppléer seul aux inévitables périodes de 100% d’intermittences. Dans ce schéma, le taux de charge du gaz serait alors de seulement 30% et les émissions ramenées à 35 Mt<sub>CO2</sub>/an. On voit donc que même dans le cas d’une augmentation très significative des renouvelables, le couple ENR/gaz ne permettra pas d’accéder à la cible des 95%.

Quelles sont alors les solutions ? Nous en avons relevé quatre.



**Figure 2 - Poursuite de la décarbonation au-delà du scénario *Lièvre* sans sortie du nucléaire**

- ✓ La première est de conserver le parc nucléaire (ce qui nécessitera d'importants investissements pour en prolonger sa vie) voire de l'étendre. En maintenant les 6 GW de nucléaire, les émissions 2050 atteignent 28 Mt<sub>CO2</sub>/an soit une réduction de 77% par rapport au niveau 1990. C'est 10 points de plus que les 67% du scénario *Lièvre*. Mais surtout, la tendance (**Figure 2**) montre que la cible des 95% de la loi climat est cette fois tout à fait atteignable. Ceci est d'ailleurs confirmé par la valeur de l'intensité énergétique (0,80 MWh/k€) nettement supérieure à la valeur asymptotique de 0,70 MWh/k€. **En maintenant le nucléaire, *Lièvre* possède donc des réserves suffisantes d'intensité énergétique pour atteindre la cible des 95% de la loi climat.** Ces réserves se trouvent notamment dans la cogénération nucléaire qui pourrait être mise en œuvre dans de nouvelles unités comme cela a été fait pour le gaz (et non prise en compte dans la **Figure 2**). Autrement dit, sans sortir du nucléaire, la loi climat est donc compatible à la fois avec l'objectif de 95% tout en restant dans une société de croissance économique.
- ✓ La seconde solution est la plus prisée mais aussi la plus incertaine. Elle suppose que **le gaz et le nucléaire seront à moyen terme totalement substituables par des énergies renouvelables** en augmentant grâce au digital les échanges d'électricité (renouvelables)

sur la grille européenne<sup>10</sup> mais surtout grâce à la mise en œuvre **massive** de possibilités de stockage : pompage/turbinage, batteries, hydrogène pour l'essentiel. Ces capacités de stockage n'ont en effet été considérées que de façon marginale dans *Lièvre* avec l'introduction dans le parc de véhicules de 2% de voitures hydrogène. Mais, bien au-delà des technologies (batteries, éoliennes, panneaux solaires, chaîne hydrogène) qui finalement sont toutes matures, **c'est l'échelle de la mise en œuvre qui a de quoi effrayer**. Puissance électrique démesurée pour produire l'hydrogène, métaux rares et matériaux électrolytiques des batteries et/ou des piles à combustible sont autant de problèmes annexes qu'il faudra gérer notamment sur le plan géopolitique dans la mesure où ils sont encore plus mal distribués sur la surface de la planète que les combustibles fossiles, la Chine et la Russie recelant plus de 50% des réserves mondiales. Ainsi, remplacer l'essence et le diesel consommés en 2016 par de l'hydrogène demanderait 80 TWh soit l'équivalent de la production électrique belge actuelle. 80TWh fait appel à la puissance de 10 réacteurs nucléaires ou de... vingt mille éoliennes de 2MW.

- ✓ La troisième solution consiste à capter puis à injecter une partie du CO<sub>2</sub> résiduel (notamment celui des sites industriels) dans le sous-sol. Dans la mesure où des sites de stockage n'ont pas encore été identifiés en Belgique, le CCS (Carbon Capture & Storage) n'a pas été considéré dans cette étude. Malgré les fortes réticences sociétales, il aura sûrement sa place dans la future transition belge et contribuera à une réduction supplémentaire des émissions. Mais, pour réduire ses émissions de 95% il faudrait alors que la Belgique puisse stocker de l'ordre de 20 millions de tonnes annuelles de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. Cette technologie s'appliquera surtout aux gros émetteurs industriels, l'industrie étant le principal usage où les émissions sont aujourd'hui les plus difficiles à réduire.
- ✓ Enfin, la dernière solution serait d'imposer des mesures sociétales draconiennes (restriction des transports, de la surface habitable, de la température des logements, de la consommation d'eau chaude et d'électricité). En dehors de son acceptabilité sociétale loin d'être acquise, un tel programme détruirait des pans entiers de notre économie et réduirait à coup sûr une partie importante de l'activité. L'objectif 95% conjugué à la sortie du nucléaire se ferait alors aux dépens de la croissance économique. Une conclusion que l'on retrouve d'ailleurs au niveau de l'intensité énergétique (0,72 MWh/k€ avec 50% de renouvelables) qui atteint en 2050 la valeur asymptotique de 0,7 MWh/k€. *Lièvre* n'offre donc plus aucune réserve de réduction de l'intensité énergétique dans le contexte d'une poursuite de la croissance économique.

---

<sup>10</sup> La Belgique a récemment investi dans une capacité d'interconnexion supplémentaire avec ses voisins européens, ce qui en fait l'un des réseaux les plus ouverts et les plus interconnectés d'Europe



La qualité d'une transition énergétique se mesure à l'aide de quatre indicateurs fondamentaux calculés sur une base annuelle :

- l'intensité énergétique est le rapport entre la quantité d'énergie primaire consommée et le PIB. Elle s'exprime en MWh/k€.
- le contenu carbone qui est le rapport entre les émissions annuelles et la quantité d'énergie primaire consommée. Il s'exprime en  $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$
- les émissions par habitant qui s'exprime en  $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{hab}$
- l'indice de sobriété énergétique qui est le rapport entre l'énergie primaire consommée et le nombre d'habitants. Il s'exprime en MWh/hab

## INTRODUCTION

Deux défis majeurs façonneront la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle : la révolution digitale d'une part, la transition énergétique de l'autre. Défis car complexes à piloter, majeurs car l'un et l'autre peuvent profondément remettre en cause la société de croissance.

La société de croissance s'est installée de façon pratiquement pérenne en Europe depuis le dernier conflit mondial. Nous souhaitons la conserver. Mais, la société de croissance est aussi un processus profondément entropique responsable, via la combustion des énergies fossiles, des émissions de CO<sub>2</sub>. La Belgique, qui a ratifié l'Accord de Paris le 6 avril 2017, souhaite comme ses confrères européens réduire significativement ses émissions de CO<sub>2</sub>. Le projet de loi climat<sup>11</sup> vise ainsi -35% (35% pour la Flandre, 37% pour la Wallonie et 32% pour Bruxelles) à l'horizon 2035 et -95% à l'horizon 2050 avec un mix énergétique 100% renouvelables et un abandon complet de l'énergie nucléaire.

On peut qualifier cet agenda « *d'inversé* » dans la mesure où les chiffres sont simplement des objectifs sans mettre derrière ni solutions technologiques, ni moyens financiers ni conséquences sociétales. Une question de fond est notamment d'estimer si une réduction aussi drastique des émissions ne bouleversera pas la plupart des habitudes quotidiennes et restera compatible avec une société de croissance.

La démarche choisie par la plate-forme transition énergétique FABI est différente. Partant d'une ligne de référence construite à partir d'un historique des consommations d'énergie au cours des 15 dernières années, trois scénarios robustes de transition énergétique ont été développés. Chacun des scénarios comporte des hypothèses plus ou moins fortes destinées à déplacer les énergies fossiles vers les énergies décarbonées mais aussi et surtout à réduire la consommation grâce à une amélioration de l'efficacité énergétique.

Les scénarios s'appuient sur des technologies jugées suffisamment matures pour être aisément mises en œuvre dans les secteurs des transports, de l'habitat, de l'industrie et de la génération électrique mais aussi sur une évolution raisonnable des techniques, des organisations et des procédés. Quelques nouvelles pistes technologiques qui devraient dans l'avenir contribuer à la transition énergétique sont évoquées dans des encadrés.

Les scénarii prennent en compte la faible croissance démographique de la population belge. S'ils considèrent certaines évolutions comportementales, les trois scénarii supposent que la croissance économique se poursuit en Belgique. En fait, la réduction des émissions ne doit pas être considérée comme un préalable mais comme un résultat contraint par les hypothèses technologiques, comportementales et économiques retenues dans chaque scénario.

---

<sup>11</sup> <https://www.levif.be/actualite/belgique/le-plan-national-energie-climat-approuve-en-comite-de-concertation/article-normal-1069663.html>

Le choix de concentrer les scénarii sur le territoire Belge uniquement justifie notamment le fait que les transports aériens (pas de vols intérieurs en Belgique) et maritimes ont été exclus du périmètre. Les scénarios se limitant à la question de l'énergie, certaines émissions périphériques comme celles liées à l'agriculture n'ont pas été considérées.

## LE MIX ENERGETIQUE MONDIAL

L'humanité a consommé en 2017 157 PWh<sup>12</sup> d'énergie primaire toutes sources confondues. C'est 2,75 fois plus qu'en 1970 quand les pays de l'OCDE vivaient les dernières années des « trente glorieuses ».

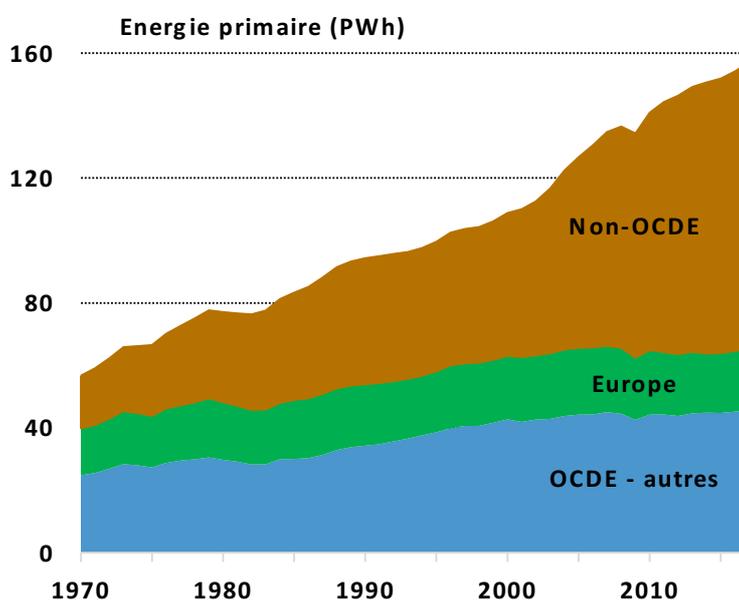


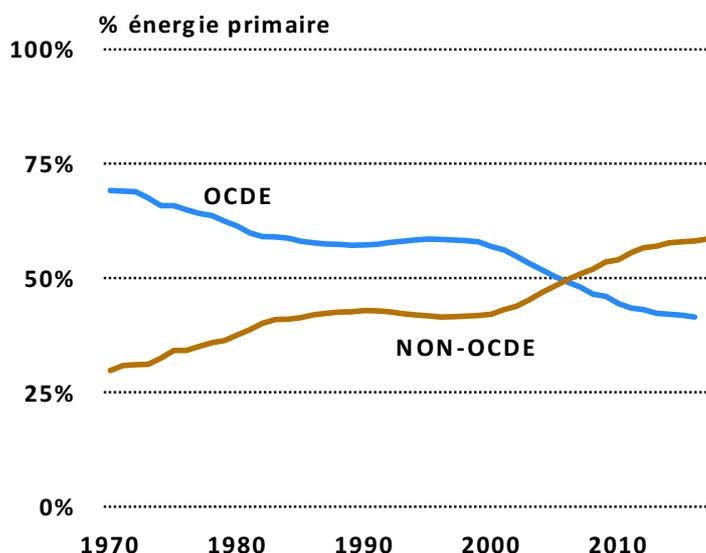
Figure 3 – Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire

Source : BP statistical review 2018

Mais, cet accroissement significatif de consommation d'énergie est loin d'être géographiquement homogène (**Figure 3**). Alors que les pays de l'OCDE, ont vu leur consommation augmenter de 60%, celle des pays NON-OCDE a été multipliée par 5,4. Cette tendance fortement haussière déjà bien présente durant les années 80 et 90 s'est surtout accélérée à partir du début du XXI<sup>e</sup> siècle suite à la mondialisation de l'économie. Quant à l'Europe, elle a vu sa consommation d'énergie stagner dès le milieu des années 80. Elle a consommé en 2017 20 PWh d'énergie primaire soit l'équivalent de 1987.

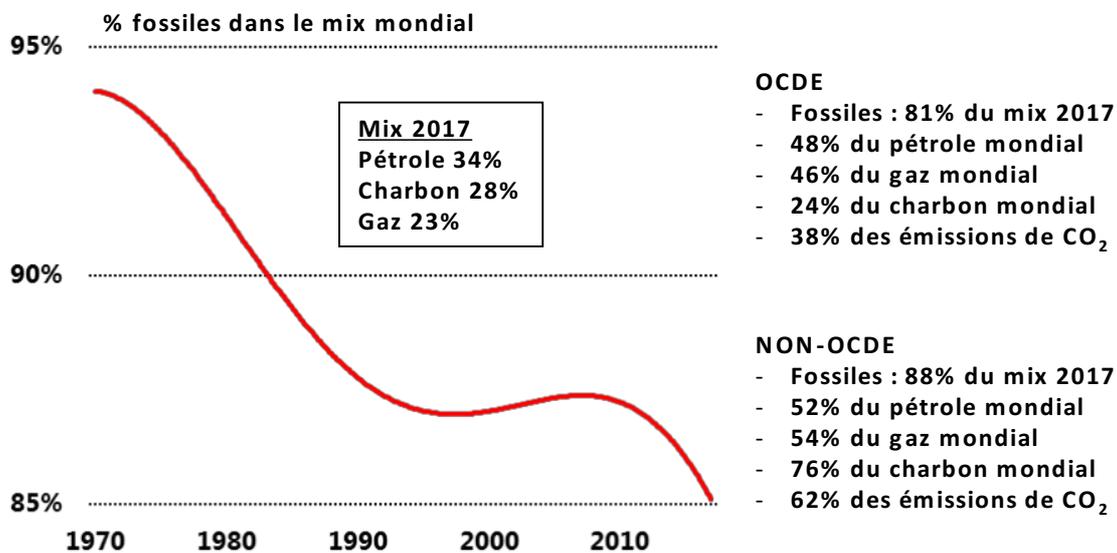
<sup>12</sup> Un PWh (Petawattheure) est égal à 1000 TWh (Terawattheure) ou à un milliard de MWh (Mégawattheure)

Les courbes des pays OCDE et NON-OCDE se sont croisées en 2006 (**Figure 4**). En 2017, les pays NON-OCDE consommaient 60% de l'énergie primaire contre 40% pour les pays de l'OCDE. En 1970, le rapport était de 70/30 en faveur des pays de l'OCDE.



**Figure 4 – Historique de l'évolution de l'énergie primaire entre pays de l'OCDE et pays NON-OCDE**  
*Source des données : BP statistical review 2018*

Sur les 157 PWh d'énergie primaire consommés en 2017, 85% étaient d'origine fossile (pétrole + charbon + gaz naturel). C'est 10% de moins qu'au début des années 70. Cette réduction résulte de deux périodes bien distinctes (**Figure 5**). Durant les années 70 et 80 on assiste à un déplacement significatif de la génération électrique du pétrole vers le nucléaire dans les pays de l'OCDE. Puis, après 2008 un nouveau déplacement de la génération électrique du charbon vers les énergies renouvelables intermittentes (solaire et éolien pour l'essentiel) est cette fois mis en œuvre principalement en Europe, aux Etats-Unis et en Chine.



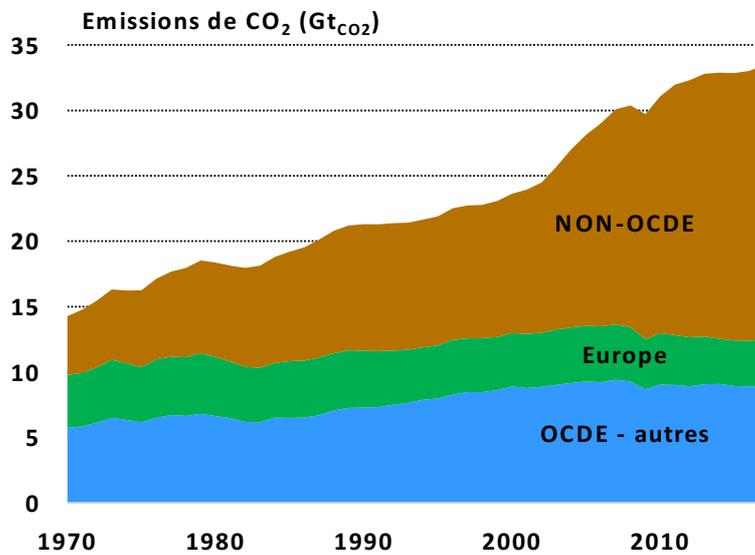
**Figure 5 – Evolution du mix fossile depuis 1970.**  
**Part des fossiles dans le mix OCDE et NON-OCDE en 2017**

Source : BP statistical review 2018

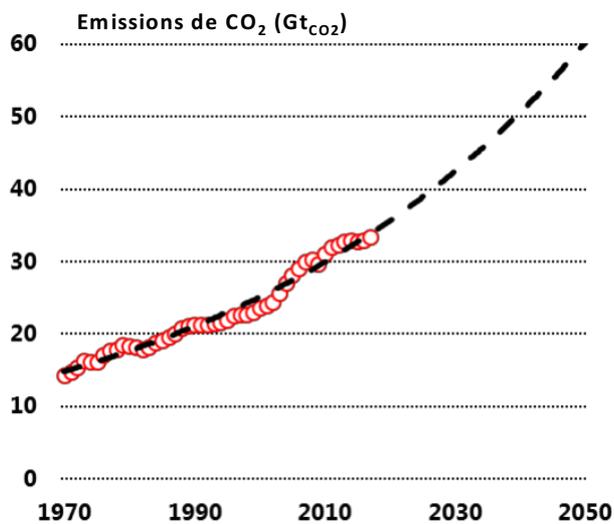
Le mix mondial 2017 contenait 34% de pétrole, 28% de charbon et 23% de gaz naturel. Géographiquement, le mix des pays de l'OCDE (81% de fossiles) est globalement moins carboné que celui des pays NON-OCDE (88% de fossiles).

Qualitativement, si les mix sont assez voisins pour le pétrole (52% pour les pays NON-OCDE) et le gaz (54% pour les pays NON-OCDE), ils sont profondément différents pour le charbon. En effet les pays NON-OCDE consomment 76% du charbon mondial contre seulement 24% pour les pays de l'OCDE. La combustion des énergies fossiles émettait en 2017 environ 33 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (

**Figure 6**) dont 38% pour les pays de l'OCDE et 62% pour les pays NON-OCDE (**Figure 5**). C'est 2,3 fois les émissions de 1970. La surémission des pays NON-OCDE résulte principalement du charbon massivement utilisé dans la génération électrique et le chauffage domestique. Le déplacement du charbon vers d'autres sources d'énergie représente donc l'une des principales priorités de la transition énergétique mondiale. Une poursuite de la tendance actuelle conduirait à l'horizon 2050 à un presque doublement des émissions. Elles atteindraient alors environ 60 Gt<sub>CO2</sub>/an (**Figure 7**)



**Figure 6 – Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux énergies fossiles depuis 1970**  
*Source des données : BP statistical review 2018*



**Figure 7 – Extrapolation des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 sans changement profond de stratégie (« business as usual »)**  
*Source des données : BP statistical review 2018*

## L'ÉQUATION DE KAYA ET LES PRINCIPAUX INDICATEURS ÉNERGETIQUES

L'équation de Kaya<sup>13</sup> est une expression mathématique qui permet de décomposer les émissions de CO<sub>2</sub> d'une région ou d'un pays en facteurs technologiques, économiques, environnementaux et démographiques. Elle met en évidence plusieurs indicateurs fondamentaux qualifiant l'état et l'évolution d'une transition énergétique. Elle s'écrit :

$$CO_2 = \frac{CO_2}{MWh} \times \frac{MWh}{k\text{€}} \times \frac{k\text{€}}{\text{hab}} \times \text{hab}$$

De droite à gauche, les quatre indicateurs sont

- (1) hab représente la croissance démographique
- (2) k€/hab représente la croissance économique
- (3) MWh/k€ est l'intensité énergétique c'est-à-dire la quantité d'énergie requise pour produire 1000 euros de richesse. Plus elle est faible plus l'économie est performante puisqu'elle nécessite moins d'énergie pour produire une quantité équivalente de richesses. On estime aujourd'hui que l'intensité énergétique asymptotique (valeur minimum compatible avec une société de croissance économique) est de l'ordre de 0,7 MWh/k€.
- (4) CO<sub>2</sub>/MWh est le contenu carbone d'une énergie (ou d'un mix énergétique donné). Plus il est faible plus le mix est décarboné. Élevé pour le charbon, intermédiaire pour le pétrole et faible pour le gaz, le contenu carbone est normalement (si on s'en tient à la seule phase d'utilisation) nul pour le nucléaire et les énergies renouvelables.

Le premier membre peut aussi être normé par la démographie. On fait alors apparaître CO<sub>2</sub>/hab qui est un quatrième indicateur. Bien que souvent utilisé, il a l'inconvénient de ne pas être global et de s'affranchir de la composante démographique pourtant essentielle dans la transition énergétique. Enfin, on peut aussi calculer l'indice de sobriété énergétique qui est la quantité d'énergie primaire consommée annuellement par habitant. Elle s'exprime en MWh/hab.

L'intérêt de l'équation de Kaya est surtout pédagogique : elle met en évidence de façon très simple les quatre leviers de la transition énergétique (démographie/économie/intensité énergétique/contenu carbone). Elle est par contre critiquable sur le plan théorique dans la mesure où les quatre termes ne sont pas indépendants. Ainsi, par exemple, la croissance économique ralentit la démographie (les femmes font de plus longues études et ont leur premier enfant plus tard). De même la croissance économique donne davantage de moyens à la

<sup>13</sup> Yoichi Kaya et Keiichi Yokobori, Environment, energy, and economy : strategies for sustainability : Tokyo conference on Global Environment, Energy and Economic Development (1993), United Nations Univ. Press, Tokyo, 1997, 381 p.

recherche pour améliorer l'intensité énergétique et déplacer les énergies fossiles vers des énergies décarbonées.

### COMPARAISON DES PRINCIPAUX INDICATEURS MONDIAUX

Les quatre indicateurs (intensité énergétique, contenu carbone, émission par habitant et sobriété énergétique) sont présentés dans la **Figure 8**. Les chiffres mettent clairement en évidence qu'en termes d'intensité énergétique les pays NON-OCDE sont bien au-dessus de la moyenne mondiale alors que les pays de l'OCDE sont au contraire en dessous de cette moyenne mondiale. Avec 1,28 MWh/k€, l'Europe apparaît comme le meilleur élève bien en-dessous de la moyenne mondiale mais aussi de la moyenne des pays de l'OCDE et en particulier des Etats-Unis. L'intensité énergétique de l'Europe est de moitié inférieure à celle des pays NON-OCDE, la Chine se situant dans la moyenne des pays NON-OCDE.

Région	Intensité énergétique	Contenu carbone	Emissions par habitant	Sobriété énergétique
	MWh/k€	kg <sub>CO2</sub> /MWh	t <sub>CO2</sub> /hab	MWh/hab
<b>Monde</b>	<b>2,2</b>	<b>213</b>	<b>4,4</b>	<b>20,9</b>
<b>OCDE</b>	<b>1,5</b>	<b>191</b>	<b>9,6</b>	<b>50,1</b>
<b>Non-OCDE</b>	<b>3,3</b>	<b>228</b>	<b>3,4</b>	<b>15,0</b>
<b>Chine</b>	<b>3,4</b>	<b>253</b>	<b>6,7</b>	<b>26,3</b>
<b>US</b>	<b>1,5</b>	<b>196</b>	<b>15,6</b>	<b>79,8</b>
<b>Europe</b>	<b>1,3</b>	<b>180</b>	<b>6,9</b>	<b>38,3</b>

**Figure 8 – Indicateurs énergétiques mondiaux (base annuelle)**

*Source des données : BP statistical review 2018 et World Bank*

Bien que les mêmes conclusions se retrouvent au niveau du contenu carbone, les différences entre les pays de l'OCDE et les pays NON-OCDE sont moins marquées. Cela est dû au fait que le mix des pays de l'OCDE, bien que moins carboné (et surtout beaucoup moins « charbonnier ») que celui des pays NON-OCDE, reste quand même largement dominé par les énergies fossiles (**Figure 5**).

Avec 180 kg<sub>CO2</sub>/MWh, l'Europe est à nouveau sous la moyenne mondiale mais aussi sous la moyenne OCDE. Enfin comme déjà mentionné, la production de CO<sub>2</sub> par habitant est un indicateur trompeur car biaisé par la démographie des pays NON-OCDE qui représentent plus de 80% de la population mondiale. On peut toutefois noter l'excellente valeur de l'Europe en termes d'émissions par habitant.

Si, l'européen se situe au-dessus de la moyenne mondiale et émet légèrement plus que le chinois, il émet presque trois fois moins que l'américain. Les émissions « *gargantuesques* » de l'américain proviennent en partie de la génération électrique (où le charbon occupe toujours une place significative) mais surtout des transports. Les mêmes conclusions sont obtenues pour l'indice de sobriété énergétique.

L'Américain consomme en moyenne deux fois plus d'énergie que l'Européen qui lui-même consomme deux fois plus que le terrien moyen. Mais, avec 38MWh/hab, l'Européen se situe bien en dessous de la moyenne des pays de l'OCDE (50 MWh/hab). La moyenne des pays NON-OCDE est trois fois inférieure à celle des pays de l'OCDE.

La forte différence d'intensité énergétique est essentiellement due à la faible performance énergétique des pays NON-OCDE : habitat mal isolé, parc de voitures âgé et mal entretenu, procédés et organisations industrielles obsolètes.

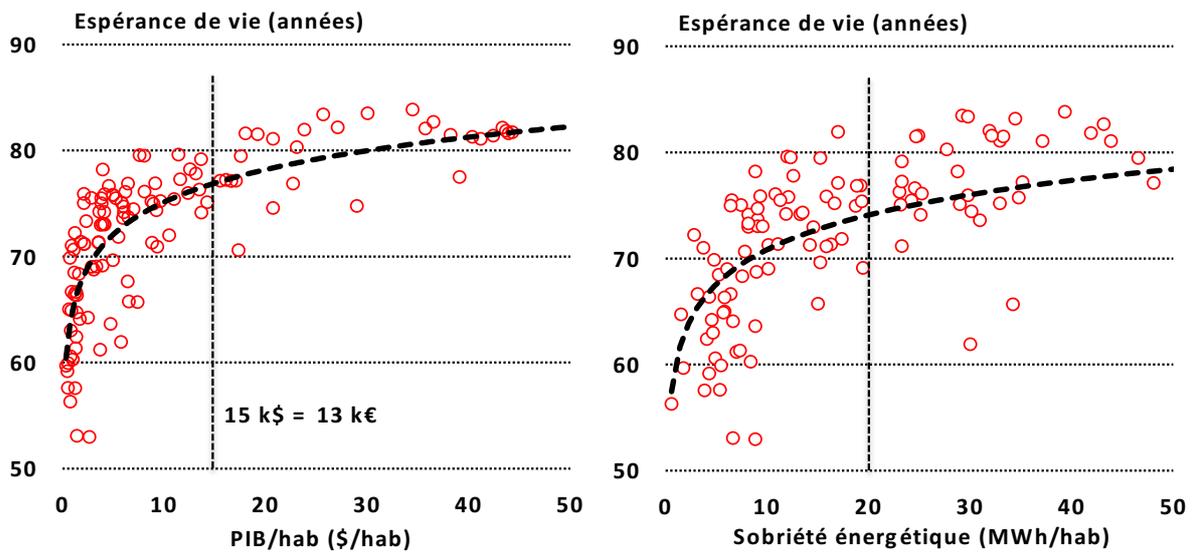
Mais, une autre cause souvent avancée est la délocalisation d'une partie de l'industrie lourde (et donc énergivore) des pays OCDE vers les pays NON-OCDE. Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, l'industrie européenne s'est en effet contractée d'environ 3% (en part du PIB) au profit des services (**Figure 29**). Toutefois, l'industrie ne représentant que 30% de la consommation globale d'énergie, la délocalisation ne justifie qu'une partie limitée de la différence d'intensité énergétique entre pays OCDE et NON-OCDE. L'énorme écart tient surtout dans la faible performance du modèle énergétique des pays NON-OCDE. Ramener dans les pays OCDE une partie de l'outil industriel délocalisé permettrait de mieux contrôler les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> sans pour autant fortement accroître nos émissions domestiques.

## ENERGIE, ECONOMIE ET DEVELOPPEMENT

Les indicateurs énergétiques sont aussi clairement corrélés à la plupart des indicateurs de développement comme l'espérance de vie ou la mortalité infantile. Ainsi, sur la **Figure 9** nous avons porté l'espérance de vie (chaque point représente un pays – situation en 2016) en fonction du PIB/hab (graphe de gauche) et de la sobriété énergétique (graphe de droite). Ces courbes fortement non linéaires mettent en évidence un double seuil économique et énergétique (environ 15 k\$/hab pour le PIB et 20 MWh/an pour l'indice de sobriété énergétique) au-delà desquels l'indice de développement croît de façon beaucoup plus marginale. La mondialisation y a d'ailleurs largement contribué depuis une vingtaine d'années<sup>14</sup> en opérant un transfert de richesses et d'énergie des pays OCDE vers les pays NON-OCDE permettant mécaniquement d'assurer un rééquilibrage du développement. La croissance économique et son corollaire qu'est l'accès à l'énergie restent donc les meilleurs garants du développement à

<sup>14</sup> En 1995, le PIB des pays de l'OCDE était en moyenne 15 fois supérieur à celui des NON-OCDE. Ce rapport a aujourd'hui été réduit à 7

condition de s'appuyer sur une consommation aussi sobre que possible. Ceci justifie la pertinence de l'intensité énergétique comme indicateur clé de la transition.



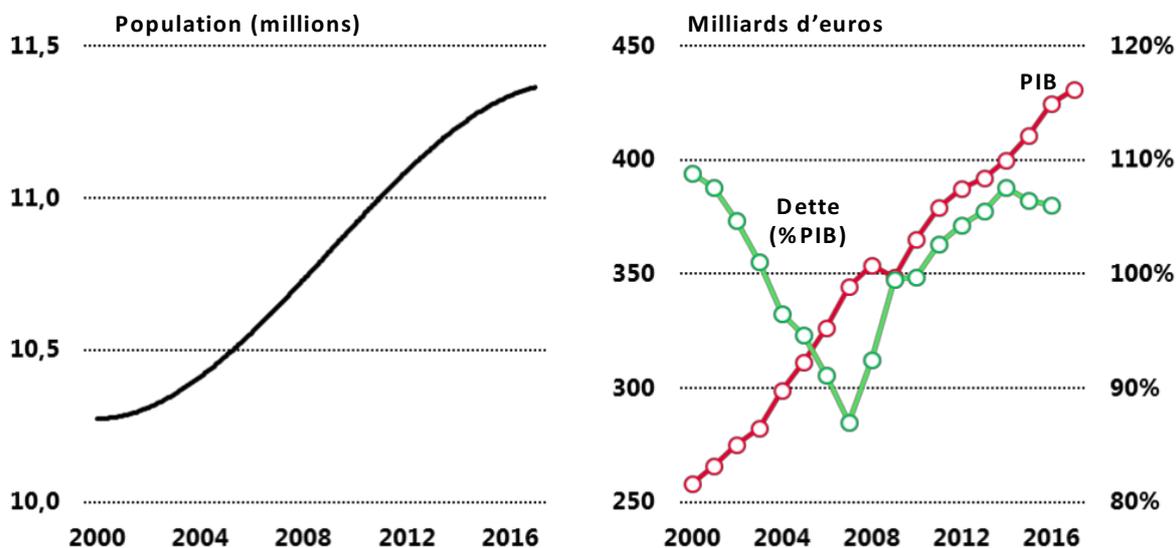
**Figure 9 – Espérance de vie en fonction de la richesse produite et de l'énergie consommée**  
 Source des données : World Bank et BP Statistical review 2018

## PREMIERE PARTIE : LIGNE DE REFERENCE 2016

### DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES

La Belgique est une monarchie parlementaire fédérale composée de trois régions : la Flandre, la Wallonie et la Région de Bruxelles. Pays fondateur de l'Union européenne, elle est le siège des principales institutions européennes mais aussi d'autres organisations internationales comme l'OTAN.

D'une superficie de 30 528 km<sup>2</sup> la Belgique était peuplée en 2016 de 11,331 millions d'habitants<sup>15</sup> soit une densité de 371 habitants/km<sup>2</sup>. Sa population s'est accrue de 11% depuis le début du siècle (**Figure 10**).



**Figure 10 – Evolution de la population belge et du produit intérieur brut depuis 2000**

Source des données : World Bank et Eurostats

Le Produit Intérieur Brut de la Belgique s'élevait en 2016 à 425 milliards d'euros en progression (**Figure 10**) de 70% par rapport au début du siècle. Entre 2000 et 2017 la croissance économique aura été en moyenne de 2% par an. La Belgique reste toutefois un pays fortement endetté. Sa dette souveraine atteignait en 2016 106% de son PIB. Elle s'était pourtant réduite de façon spectaculaire jusqu'à 87% du PIB en 2007. Mais victime, comme la plupart des pays européens, de la crise des subprimes et des dettes souveraines, elle a été obligée de laisser à nouveau filer sa dette qui s'est remise à croître significativement.

<sup>15</sup> Source : World bank

## EVOLUTION DU MIX ENERGETIQUE PRIMAIRE

En 2016, la Belgique (**Figure 11**) a consommé 655 TWh<sup>16</sup> d'énergie primaire dont 71% d'énergies fossiles soit à peine 3% de moins qu'en 2000 où elle avait dépensé 674 TWh (dont 76% d'énergies fossiles).

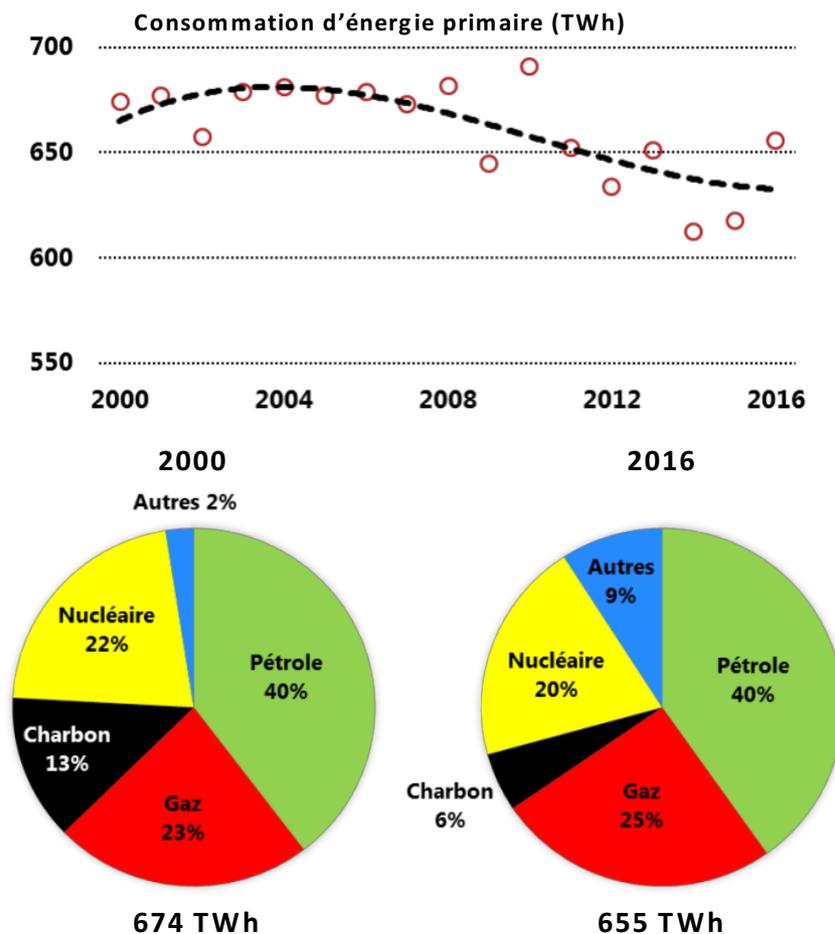


Figure 11 - Evolution du mix primaire belge depuis 2000

Source des données : STATBEL

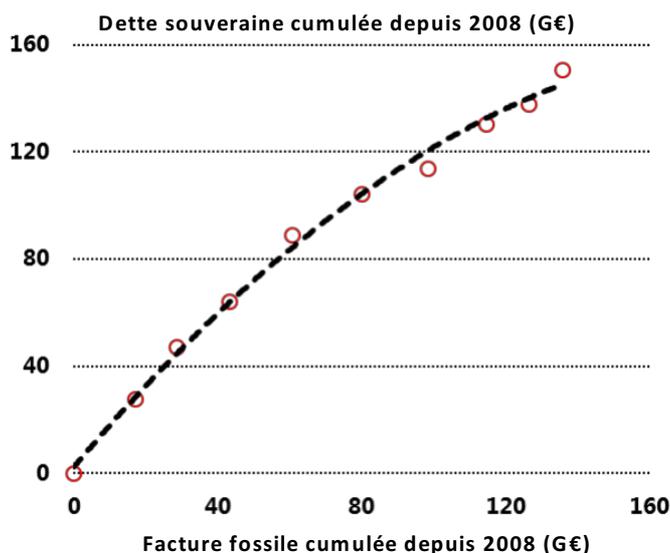
Quantitativement la consommation énergétique belge a légèrement augmenté jusqu'en 2008 puis s'est contractée suite à la crise des subprimes pour se stabiliser au niveau actuel.

<sup>16</sup> Energie chiffres clé 2017 – Economie.be

Qualitativement le mix n'a que faiblement évolué depuis le début du siècle. Alors que la part du pétrole restait constante, celle du gaz augmentait légèrement, celle du charbon se contractait de moitié et celle du nucléaire se contractait légèrement notamment au profit d'énergies alternatives comme les renouvelables intermittents (solaire & éolien comptent pour 2% du mix primaire) ou la biomasse et les déchets qui représentaient en 2016 7% du mix primaire global.



La biomasse représente l'ensemble des combustibles dérivés des végétaux. La biomasse se retrouve sous les trois états de la matière : bois (solide), biocarburants (liquide) et biogaz (gazeux). Les biocarburants liquides résultent de la distillation des huiles végétales (maïs, blé, colza) ainsi que de l'alcool obtenu à partir de la canne à sucre ou de la betterave sucrière. Le biogaz résulte de la fermentation de déchets organiques d'origine agricoles ou domestiques par des bactéries. Le biogaz existe aussi à l'état naturel à profondeur moyenne. Il s'agit du premier stade (dit biogénique) de la formation des hydrocarbures.



**Figure 12 – Corrélation entre l'accroissement de la dette souveraine belge et sa facture fossile**

Source des données : Eurostats et BP Statistical Review 2018

Enfin, comme pour la plupart des pays européens, la dette souveraine belge est fortement corrélée (**Figure 12**) à sa facture fossile. Si la dette souveraine belge a significativement rebondi après la crise des subprimes c'est notamment à cause de l'accroissement de sa facture fossile qui apparaît comme un contributeur majeur. Bien au-delà de la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>, réduire cette facture représente pour la Belgique une source majeure de croissance future.

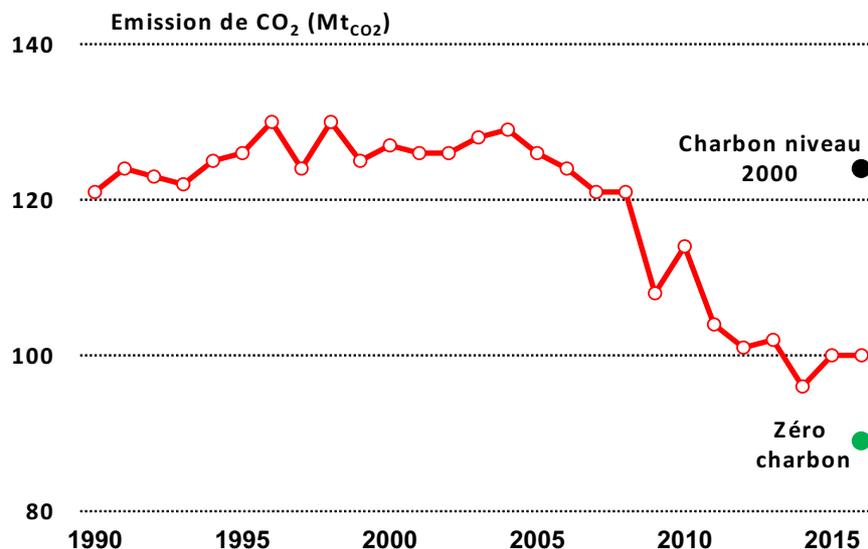


Le mix énergétique belge se caractérise par des importations anormalement élevées de pétrole brut. En 2016 elles ont atteint 364 TWh. Si l'ensemble est raffiné sur le territoire, un peu plus de 100 TWh de produits raffinés nets sont exportés. La consommation réelle 2016 n'était donc que de 263 TWh (les 40% présentés sur la **Figure 11**). Ce chiffre encore anormalement élevé (la moyenne mondiale est de 34%) intègre le pétrole utilisé pour la pétrochimie (85 TWh en 2016), dont l'utilisation « non énergétique » ne contribue pas aux émissions de CO<sub>2</sub>. En conséquence, la consommation énergétique du pétrole (transports, chauffage domestique, industrie et électricité) représentait en 2016 27% du mix.

## EVOLUTION DES EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

L'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> est présentée sur la **Figure 13**. La tendance baissière depuis 2000 est pour l'essentiel liée à la réduction de la part charbonnière passée de 89 TWh en 2000 à 35 TWh en 2016 (**Figure 11**).

Comme le montre la **Figure 13**, si cette réduction ne s'était pas opérée, sans changer les autres sources d'énergie, les émissions seraient en 2016 de 124 Mt<sub>CO2</sub> c'est-à-dire grosso modo le niveau 2000. Au contraire, une sortie complète du charbon aurait réduit les émissions de 15 Mt<sub>CO2</sub> supplémentaires pour les amener à 89 Mt<sub>CO2</sub>. La tendance 2000 à 2016 ne peut donc en rien être extrapolée au futur sans toucher aux autres combustibles fossiles (gaz et pétrole) à travers leurs différents usages.



**Figure 13 – Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> belges**

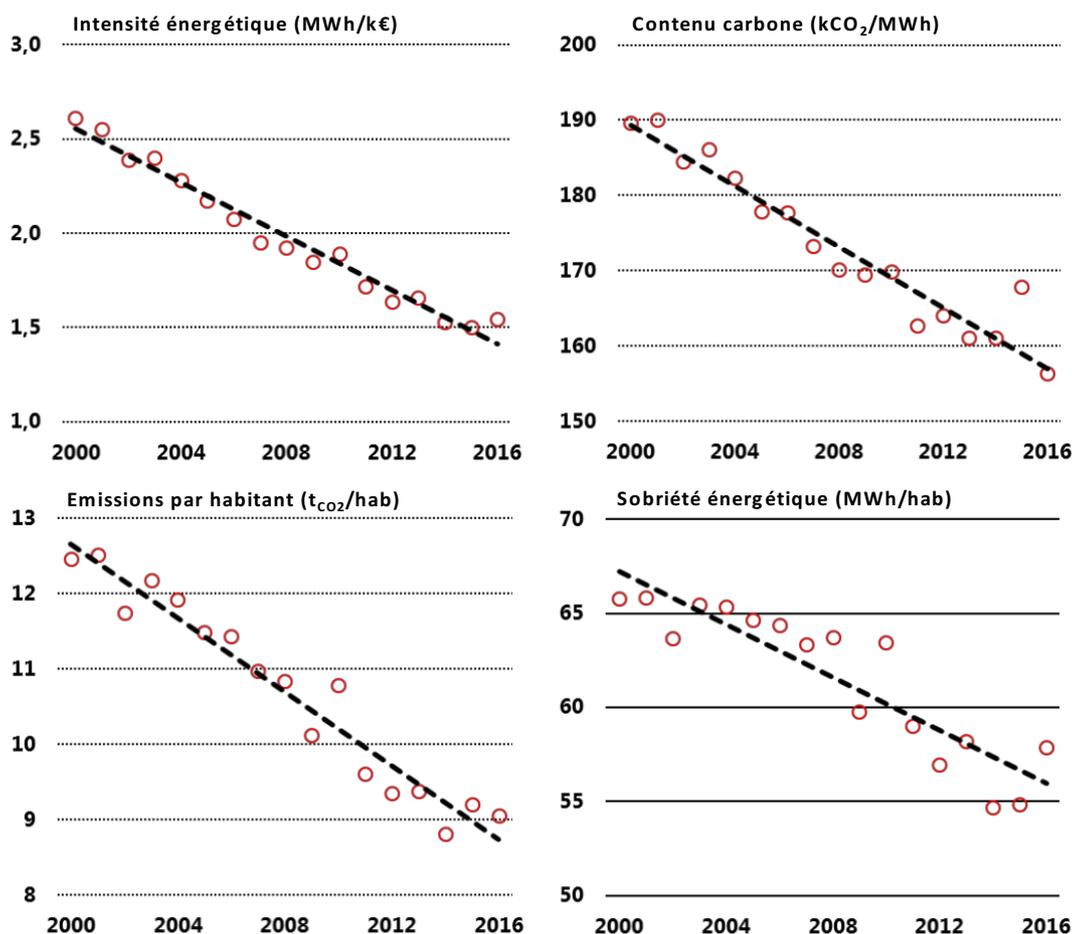
Source : [http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO<sub>2</sub>-emissions](http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions)

**PRINCIPAUX INDICATEURS ENERGETIQUES**

L'historique des quatre indicateurs énergétiques est présenté sur la **Figure 14**. S'ils ont tous diminué de façon significative depuis 2000, les performances sont différentes d'un indicateur à l'autre.

Profitant d'une croissance économique importante, l'intensité énergétique est passée de de 2,61 MWh/k€ en 2000 à 1,54 MWh/k€ en 2016. Grâce à la réduction de la part du charbon, le contenu carbone (réduction de 188 kg<sub>CO2</sub>/MWh à 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh) et les émissions par habitant (réduction de 12,4 t<sub>CO2</sub>/hab à 8,8 t<sub>CO2</sub>/hab) se sont également contractées.

Mais, même s'il a légèrement réduit sa consommation, le belge reste un important consommateur d'énergie. La Belgique possède donc des marges d'amélioration très significatives.



**Figure 14 – Historique des indicateurs énergétiques belges**  
 Source des données : World Bank, Eurostats, STATBEL

## LA BELGIQUE DANS LE CONTEXTE EUROPEEN

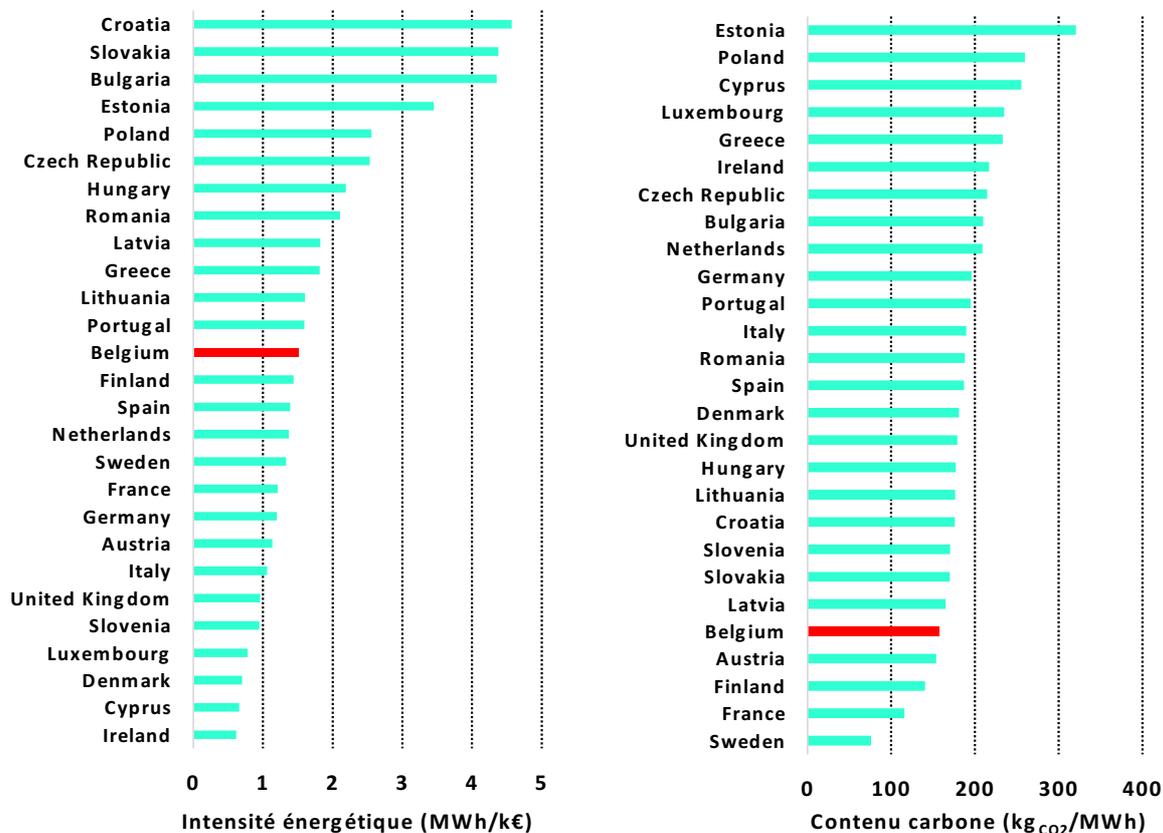
Quand on la compare à ses pairs, la Belgique apparaît à la traîne sur la plupart des grands indicateurs énergétiques (**Figure 15**).

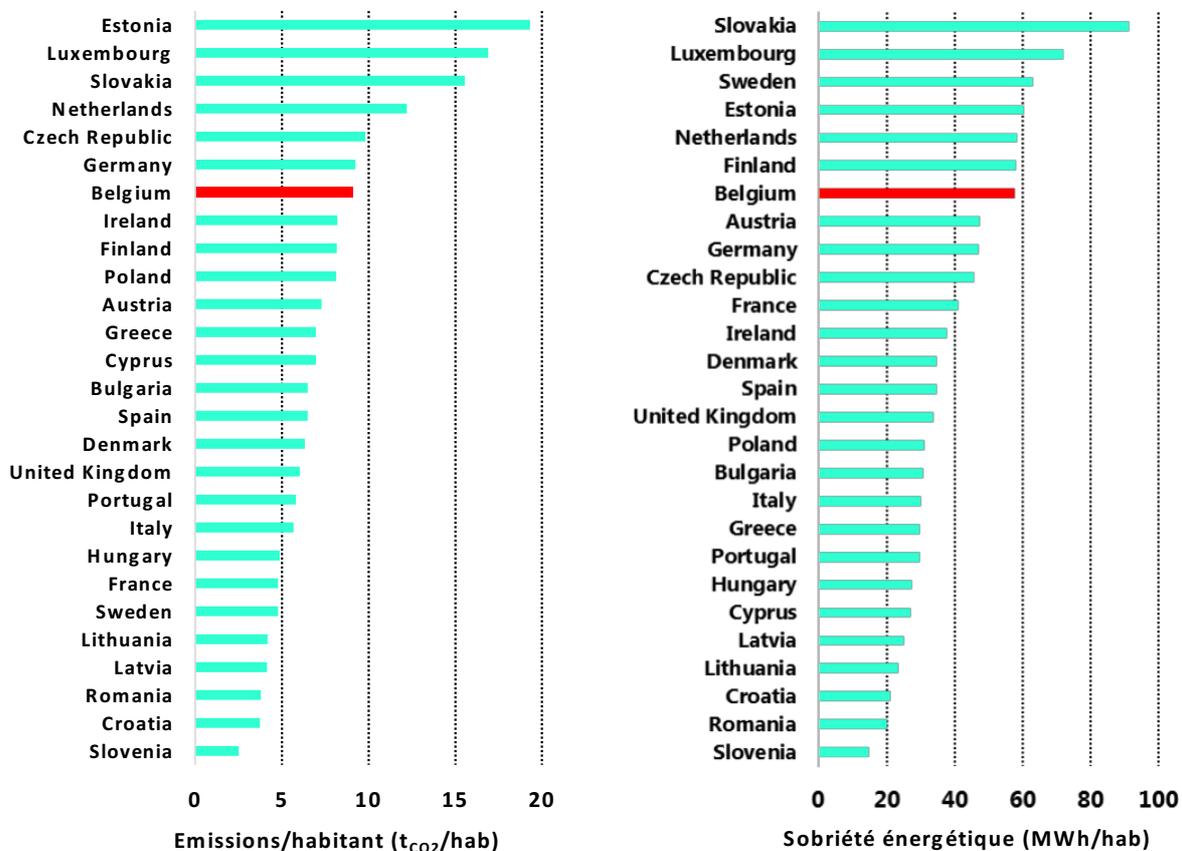
Ainsi se situe-t-elle en milieu de peloton en termes d'intensité énergétique mais bien derrière la plupart des pays clés de l'Union Européenne (France, Allemagne, Pays-Bas, Italie, Espagne, Autriche et pays scandinaves). Seuls le Portugal, la Grèce et les anciens pays du pacte de Varsovie font moins bien que la Belgique.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant et la sobriété énergétique, la Belgique se situe carrément en queue de peloton.

Par contre, grâce à sa génération électrique nucléaire, son MWh est l'un des plus décarbonés d'Europe après ceux de la Suède, de la Finlande et de la France qui sont d'ailleurs tous des pays possédant des centrales nucléaires.

Davantage que les émissions de CO<sub>2</sub>, le problème principal de la Belgique est donc sa faible efficacité énergétique. Son origine est à la fois technique et comportementale. Ces aspects seront étudiés en détail lors de l'analyse des différents usages.



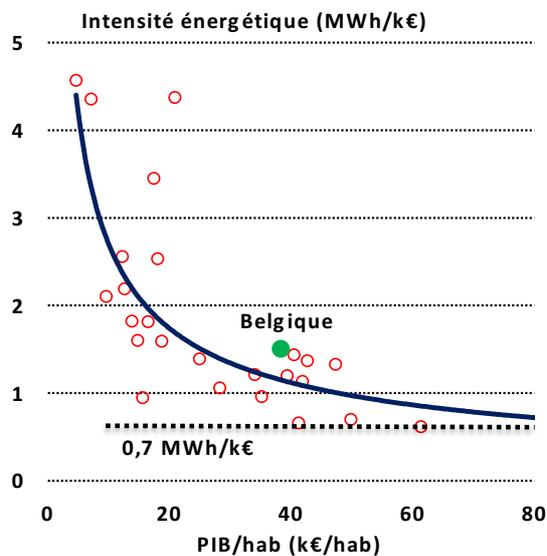


**Figure 15 – Positionnement de la Belgique au sein de l’Union Européenne**

*Source des données : BP statistical review 2018 & World Bank*

Les données européennes montrent par ailleurs que l’intensité énergétique décroît rapidement avec l’augmentation du PIB/hab (**Figure 16**).

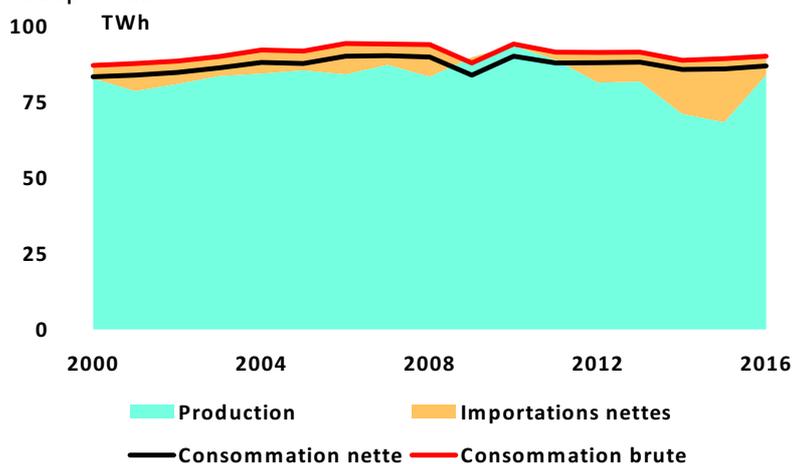
De façon moins marquée mais tout aussi nette que pour les indicateurs de développement, on retrouve le point d’inflexion de la **Figure 9** aux environs de 13 k€/hab (soit 15 k\$/hab), une valeur que la plupart des anciens pays du Pacte de Varsovie (pays Baltes, Slovénie, Croatie, Pologne, Hongrie, Roumanie, Bulgarie) n’ont pas encore atteint. Sans surprise, la Belgique se situe au-dessus de la courbe moyenne.



**Figure 16 – Intensité énergétique en fonction du PIB/hab**  
 Source des données : BP statistical review 2018 et World Bank

## LE MIX ELECTRIQUE

La Belgique a consommé en 2016 87 TWh d'électricité, une consommation nette<sup>17</sup> restée très stable depuis le début des années 2000 (**Figure 17**) Elle s'est légèrement accrue jusqu'en 2008 (de 83 TWh à 90 TWh) puis s'est faiblement contractée suite à la récession économique faisant suite à la crise des subprimes.



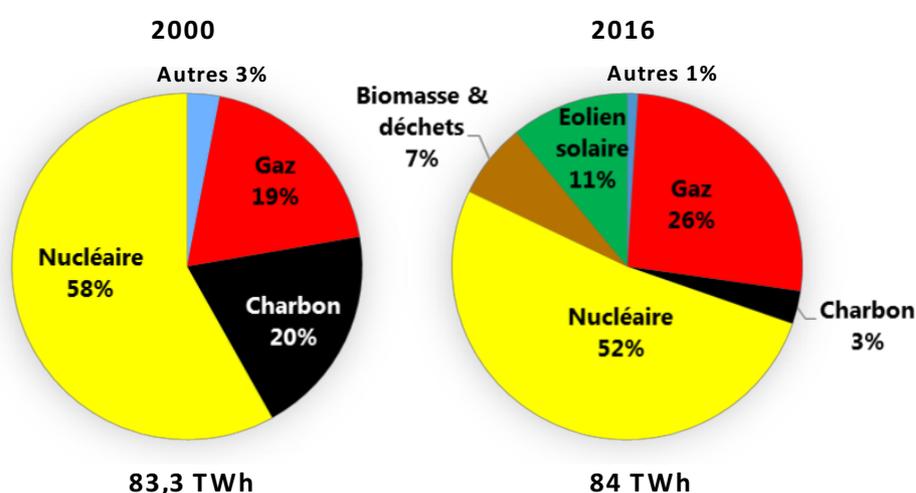
**Figure 17 – Production, consommation et imports nets d'électricité depuis 2000**  
 Source des données : STATBEL

<sup>17</sup> Egale à la consommation brute incluant les importations moins les pertes dues au transport

En dehors de 2009 et 2010, la Belgique est, depuis 2000, importateur net d'électricité. Son niveau d'importation s'est ponctuellement accru (supérieur à 20 TWh) en 2013, 2014 et 2015 suite à la fermeture temporaire de plusieurs réacteurs nucléaires. En moyenne sur les 15 dernières années, la Belgique a importé 9% de sa consommation nette.

Le mix électrique belge est depuis les années 1980 majoritairement nucléaire (**Figure 18**). Sa part qui était de 58% en 2000 s'est réduite au profit du gaz (qui est passé de 19% en 2000 à 26% en 2016) mais aussi des renouvelables (11% de solaire et d'éolien en 2016) en forte croissance et de la biomasse (7% en 2016).

Alors que la présence du pétrole et de l'hydroélectricité sont marginales (moins de 1%), celle du charbon a été significativement réduite passant de 20% en 2000 à seulement 3% en 2016.



**Figure 18 – Production électrique par sources (sortie de centrale) 2000 et 2016**  
Source des données : STATBEL

Type d'ENRi	Puissance installée (GW)	Rapport production puissance (TWh/GW)	Taux de charge (%)	Rendement (%)
Nucléaire	5,9	7,52	87%	33%
Gaz CC	3,8	4	47%	59%
Eolien	2,5	2,41	28%	NA
Solaire	3,5	0,98	11%	NA

**Figure 19 – Rapport production/puissance et taux de charge pour le nucléaire, le gaz, l'éolien et le solaire.**  
Source des données : STATBEL & BP statistical review 2018

Fin 2016, les capacités installées<sup>18</sup> en Belgique étaient les suivantes (**Figure 19**) : 5,9 GW de nucléaire, 3,8 GW gaz<sup>19</sup>, 3,5 GW de solaire et 2,5 GW d'éolien dont presque un GW en mer situés sur les parcs éoliens<sup>20</sup> de Thorntonbank au large d'Ostende, de Belwind et de Northwind au large de Zeebrugge. Un peu plus de 1000 éoliennes sont répertoriées en Belgique, dont 866 on-shore et 232 en mer.

Les historiques de production et les capacités installées permettent de calculer les rapports production puissance et les taux de charge (temps annuel moyen pendant lequel la source fournit de l'électricité à sa puissance nominale) qui sont des paramètres particulièrement importants pour les énergies renouvelables intermittentes (**Figure 19**).

Le nucléaire (taux de charge de presque 90%) et le solaire (taux de charge à peine supérieur à 10%) s'inscrivent dans les moyennes européennes. Amplifié par la proportion significative du nombre d'éoliennes off-shore, le taux de charge de l'éolien (28%) est nettement supérieur à la moyenne européenne proche de 20%.

Enfin le gaz intervenant en appui du nucléaire et des renouvelables, son taux de charge (47%) n'est pas représentatif de la technologie mais simplement de son taux d'utilisation. Comme pour le nucléaire, une pleine utilisation de ses capacités conduirait à un taux de charge proche de 90%.

En 2016, la Belgique a injecté dans sa génération électrique 232 TWh d'énergie primaire (somme de l'énergie primaire dédiée à la production augmentée des imports nets) pour une consommation nette de 87 TWh soit un rendement moyen de 37%. Le rendement du nucléaire (cycle simple) était de 33% bien inférieur au rendement des centrales à gaz CC (cycle combiné) égal à 59%.

L'accroissement de la part gazière CC et renouvelable dans le mix électrique belge a contribué à améliorer significativement le rendement de la génération électrique belge passé de 32% en 2000 à 37% en 2016.

Chaque année, près de 150 TWh d'énergie primaire sont irrémédiablement perdus dans la chaleur fatale des centrales thermiques belges. 150 TWh c'est précisément la quantité d'énergie consommée en 2016 dans l'habitat belge essentiellement sous forme de chaleur (chauffage & eau chaude).

Recourir à la cogénération dans les limites des contraintes techniques permettrait de réaliser une économie d'énergie primaire et réduirait significativement sa facture pétrolière et gazière.

---

<sup>18</sup> Ces valeurs ne prennent pas en compte les moyens de production sur les sites industriels non consolidés dans le bilan national.

<sup>19</sup> CC = Cycle Combiné

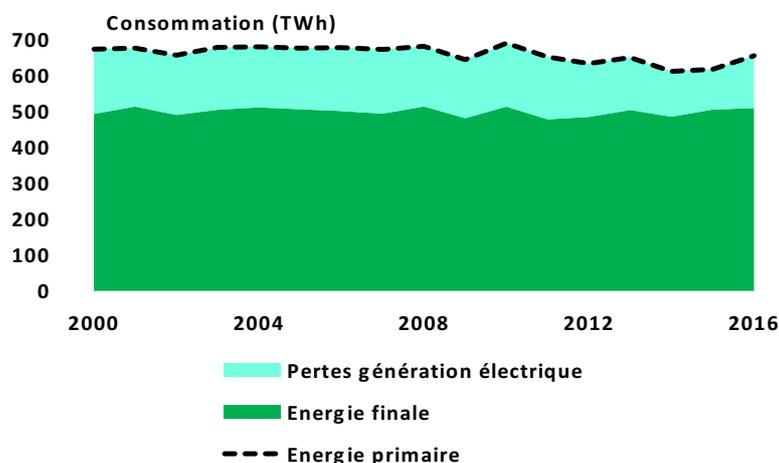
<sup>20</sup> <http://www.belwind.eu/>

## ANALYSE PAR USAGE DU MIX ENERGETIQUE FINAL

Bien que les usages de l'énergie soient multiples, selon l'Agence Internationale de l'Énergie, on peut les décomposer en quatre grandes catégories : les transports, l'habitat (au sens large domestique et tertiaire, public et privé), l'industrie et la pétrochimie. L'ensemble des activités liées aux services et au commerce (en particulier les technologies de l'information et de la communication) sont implicitement incluses dans l'habitat et les transports.

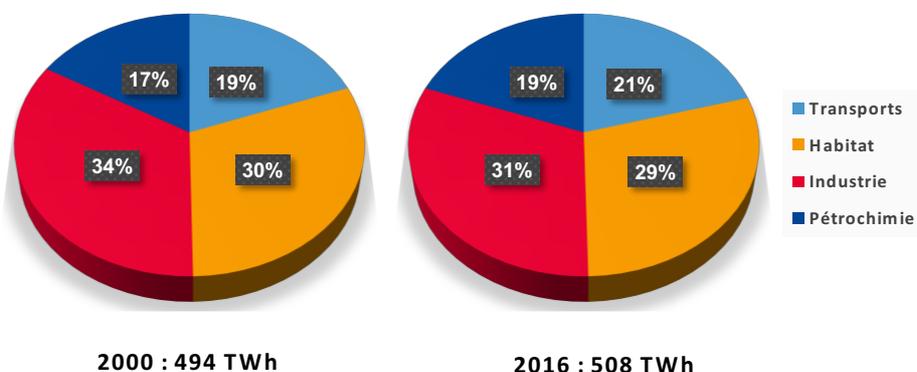
Les usages sont toujours exprimés en énergies finale et non en énergie primaire ce qui signifie que l'électricité intervient dans le mix (aussi appelé « *mix secondaire* ») directement comme source d'énergie.

Comme la consommation d'énergie primaire, la consommation d'énergie finale est restée très stable depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle passant de 494 TWh en 2000 à 508 TWh en 2016 (soit un accroissement de seulement 2,5% -**Figure 20**). Avec 30%, l'industrie en est le premier contributeur, suivi de près par l'habitat. Les transports représentent environ 20% de l'énergie finale consommée et la pétrochimie 19%.



**Figure 20 – Consommations d'énergie primaire et d'énergie finale**  
 Source des données : STATBEL

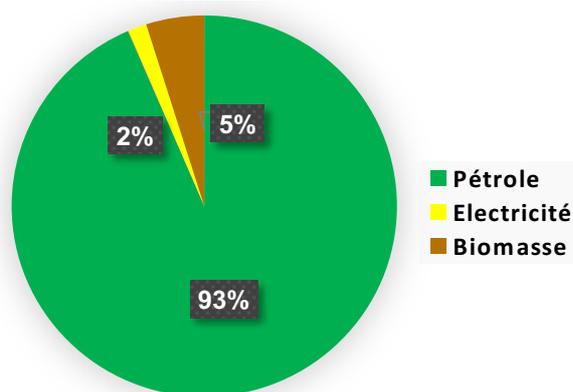
Comme pour la consommation globale, la répartition par usages (**Figure 21**) n'a que faiblement évolué depuis 2000 avec un léger déplacement de la part de l'industrie vers les transports et la pétrochimie.



**Figure 21 – Consommation d'énergie finale par usages**  
 Source des données : calcul FABI à partir des usages<sup>21</sup>

## TRANSPORTS

L'analyse a été restreinte à la route et au rail (pas de vols intérieurs et transport fluvial marginal). En 2016, les transports ont consommé 104 TWh c'est-à-dire 21% de la consommation d'énergie finale.

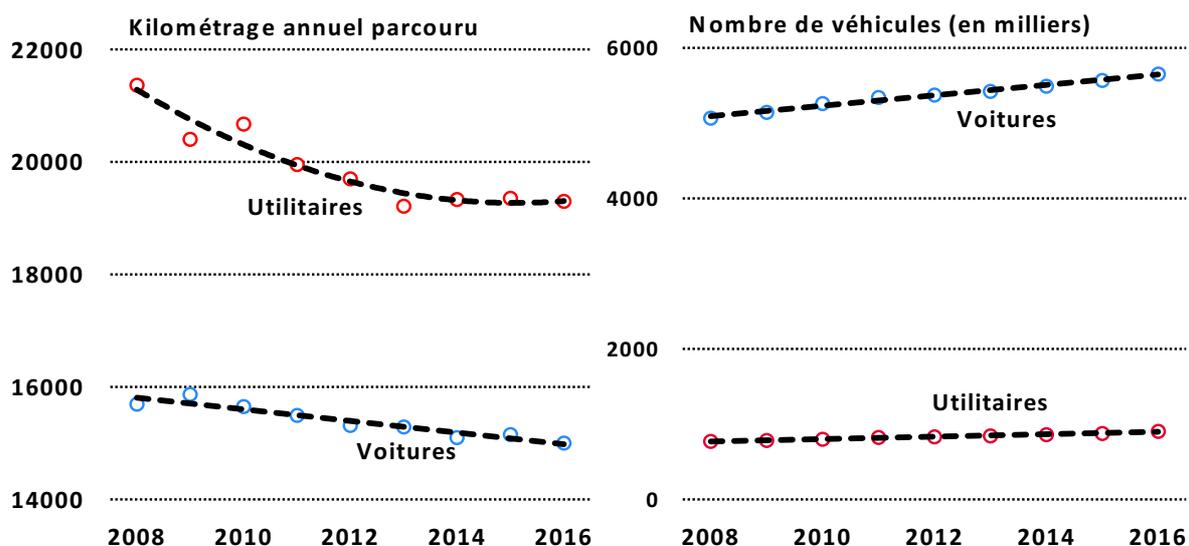


**Figure 22 – Répartition des énergies dans les transports en 2016**  
 Source des données : STATBEL

<sup>21</sup> La valeur de l'énergie finale 2016 508 TWh est légèrement supérieure à celle fournie par STATBEL

En part du mix final, c'est 2% de plus qu'en 2000. Sans surprise, les hydrocarbures liquides (tous carburants confondus essence, diesel et GPL - **Figure 22**) règnent en « *maîtres absolus* » sur les transports belges puisqu'ils y représentent 93% de la consommation d'énergie finale. Le complément est assuré par les biocarburants (5%) et l'électricité. Cette dernière est exclusivement dédiée au rail. L'électricité dédiée aux voitures électriques et le gaz naturel (liquéfié et/ou comprimé) occupent pour l'instant une place marginale dans les transports belges.

Les transports routiers ont été scindés en deux catégories : les voitures individuelles et les utilitaires supérieurs à une tonne (incluant tous les poids lourds). Le parc automobile belge (**Figure 23**) se composait en 2016 de 5 551 000 voitures individuelles et de 907 000 utilitaires. Les deux catégories sont en croissance continue depuis 2000 (+1% par an environ). Par contre, le kilométrage parcouru est lui en déclin (-0,5% par an). Au cours des 15 dernières années, la consommation des véhicules thermiques a légèrement diminué passant de 7 litres/100km à 6,4 litres/100km<sup>22</sup>. Par contre, celle des utilitaires est restée quasi constante et égale en moyenne à 32 litres/100km<sup>23</sup>.



**Figure 23 – Evolution du kilométrage parcouru et du nombre de véhicules selon catégorie**  
 Source des données : FEBIAC<sup>24</sup> et STATBEL

<sup>22</sup> <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/>

<sup>23</sup> <https://fr.statista.com/graphique/1/487208/consommation-de-carburant-moyenne-vehicule-lourd-france.jpg>

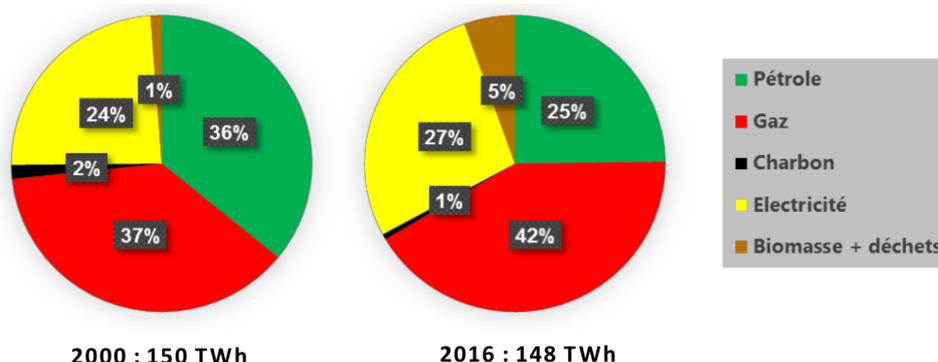
<sup>24</sup> <https://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23&lang=FR>

## HABITAT

L'habitat (domestique et tertiaire) a consommé en 2016 148 TWh d'énergie finale à peine moins qu'en 2000 (150 TWh). Il s'agit du second contributeur avec 29% de la consommation d'énergie finale. En part du mix final, c'est 1% de moins qu'en 2000. Cette énergie est avant tout dédiée à la chaleur (le chauffage et l'eau chaude représentent de l'ordre de 70% de l'énergie consommée dans l'habitat).

Par type d'énergie, l'habitat était dominé en 2016 par le gaz (42%), l'électricité (27%) et le pétrole sous forme de mazout (25%). La biomasse comptait pour 5% alors que le charbon (moins de 1%) y est devenu marginal (**Figure 24**).

Par rapport à 2000, le mix a significativement évolué avec un déplacement du fuel (-11%) vers le gaz (+5%), l'électricité (+3%) et la biomasse (+4%).



**Figure 24 – Répartition de la consommation par sources d'énergie dans l'habitat**

Source des données : STATBEL

La répartition des logements belges selon leur époque de construction a été récupérée du dernier plan cadastral. La répartition est divisée en dix tranches d'âge de la plus ancienne (antérieure à 1900) à la plus récente (postérieure à 2011).

En 2016, on recensait en Belgique 5,35 millions de logements dont 1,67 millions en Wallonie, 3,1 millions en Flandre et 567 000 dans la région Bruxelloise (**Figure 25**). Le parc belge est très ancien puisque la moitié de ses logements sont antérieurs aux années 1960 et un quart antérieur aux années 1920.

Il existe toutefois une différence notable suivant les régions. La moitié du parc wallon est antérieure à 1945 alors que le parc flamand est de 20 ans plus récent. Quant à l'habitat Bruxellois 75% des logements sont antérieurs aux années 1960 et 50% antérieurs aux années 40.

Age	Belgique	Wallonie	Flandre	Bruxelles
< 1900	807	488	243	76
1900-1918	446	174	156	116
1919-1945	755	188	426	140
1946-1961	752	177	462	113
1962-1970	559	124	382	52
1971-1981	672	187	460	25
1982-1991	370	84	274	12
1992-2001	442	105	322	14
2002-2011	412	108	289	14
> 2011	137	36	97	4
Total	5352	1673	3112	567

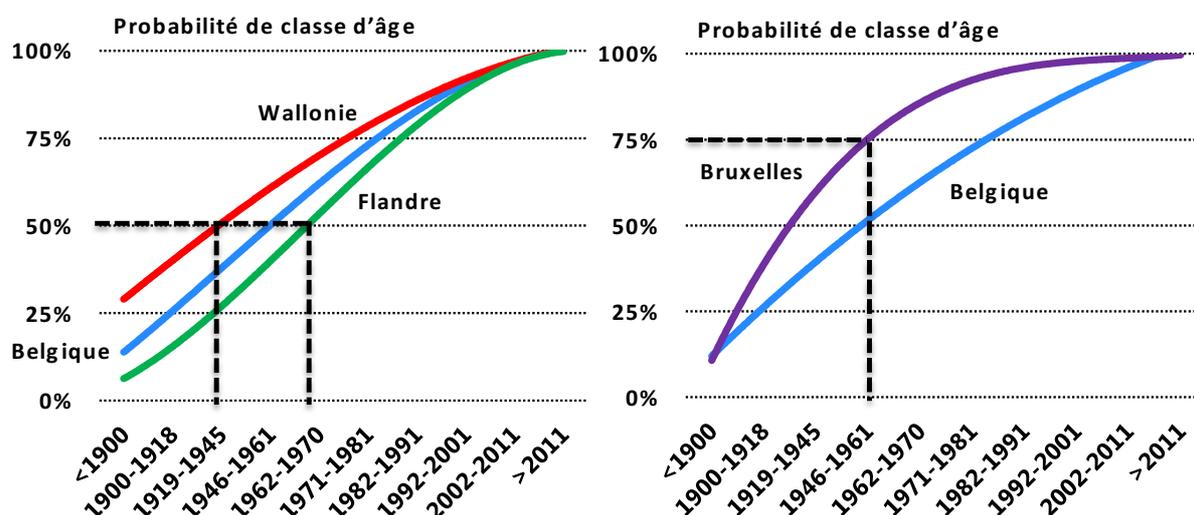
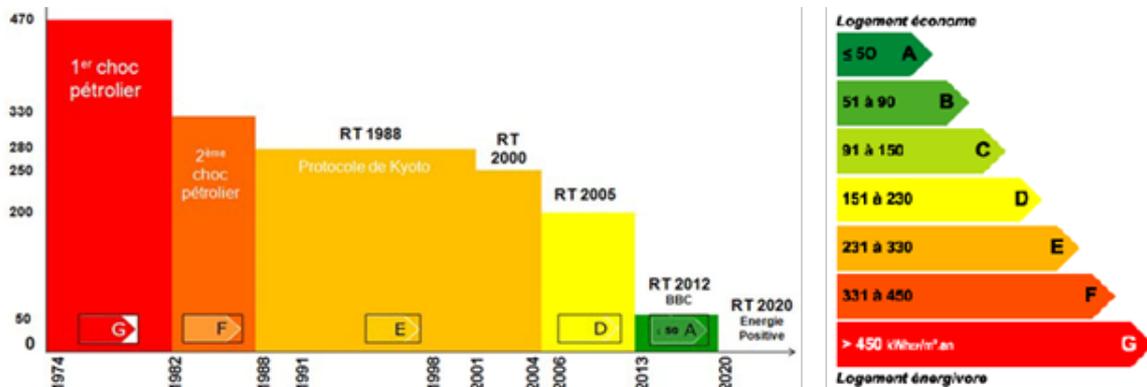


Figure 25 – Distribution des logements belges (en milliers)<sup>25</sup>

Dans la mesure où les lois de réglementation thermiques (RT) ne sont apparues qu'après le premier choc pétrolier de 1973 et n'ont été mises en œuvre qu'au début des années 1980, on peut considérer que trois quarts des bâtiments belges ont été construits sans aucune norme thermique. L'habitat représente donc à priori un des leviers majeurs de la transition énergétique belge.

<sup>25</sup><https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/parc-des-batiments#panel-12>



**Figure 26 – Performance énergétique et évolution des RT<sup>26</sup>  
Grille de performance énergétique des logements<sup>27</sup>**

Rappelons que sur le plan de ses performances énergétiques, on positionne un logement dans une grille (**Figure 26**) échelonnée de A (logement économe consommant moins de 50 kWh/an\*m<sup>2</sup>) à G (passoire énergétique consommant plus de 450 kWh/an\*m<sup>2</sup>).

Ne disposant que d'une grille récente pour l'habitat wallon, les grilles flamande, bruxelloise et belge ont été reconstituées par analogie avec la grille wallonne en fonction de leur âge. La méthodologie de calcul est présentée dans l'**Annexe 2**.

Les performances énergétiques des différentes régions (**Figure 27**) reflètent l'âge de l'habitat avec un pic en classe F pour Bruxelles (habitat en moyenne le plus dégradé et le plus ancien), une courbe décroissante pour la Wallonie et un pic en classe D pour la Flandre. Grâce à la Flandre dont le parc est en volume de loin le plus important (presque deux fois plus élevé que le wallon), l'habitat belge présente un pic en D à environ 20%.

La surface moyenne des logements belges a été estimée<sup>28,29,30</sup> à environ 75m<sup>2</sup> puis ajustée à 82m<sup>2</sup> pour mettre en cohérence la consommation globale de l'habitat 2016 (148 TWh) avec celle calculée à partir du nombre de logements et de la grille de performance énergétique 2016 (**Figure 27**). 82 m<sup>2</sup> par logement cela correspond à 38 m<sup>2</sup> par occupant, une surface inférieure à celle des français qui est en moyenne de 42 m<sup>2</sup>/habitant<sup>31</sup>.

<sup>26</sup> [https://conseils.xpair.com/consulter\\_parole\\_expert/reglementation-thermique-guide.htm](https://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/reglementation-thermique-guide.htm)

<sup>27</sup> Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>

<sup>28</sup> <https://monitoringdesquartiers.brussels/indicators/analysis/superficie-moyenne-par-logement/>

<sup>29</sup> <https://statistiques.public.lu/catalogue-publications/regards/2014/PDF-27-2014.pdf>

<sup>30</sup> STATBEL

<sup>31</sup> Stéphane BALY (2018) – « Scénario négaWatt 2017-2050. Un scénario de transition énergétique pour la France » Association négaWatt. Bruxelles le 25/09/2018

Classe	Wallonie	Flandre	Bruxelles	Belgique
	%	%	%	%
<b>G</b>	31%	9%	17%	17%
<b>F</b>	15%	12%	31%	15%
<b>E</b>	15%	20%	30%	20%
<b>D</b>	15%	22%	13%	19%
<b>C</b>	13%	21%	5%	17%
<b>B</b>	9%	13%	4%	11%
<b>A</b>	2%	3%	1%	2%
<b>Total</b>	100%	100%	100%	100%

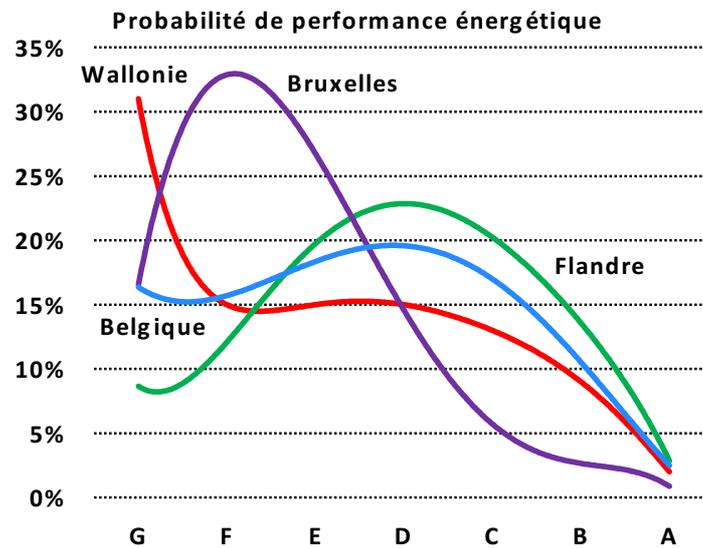
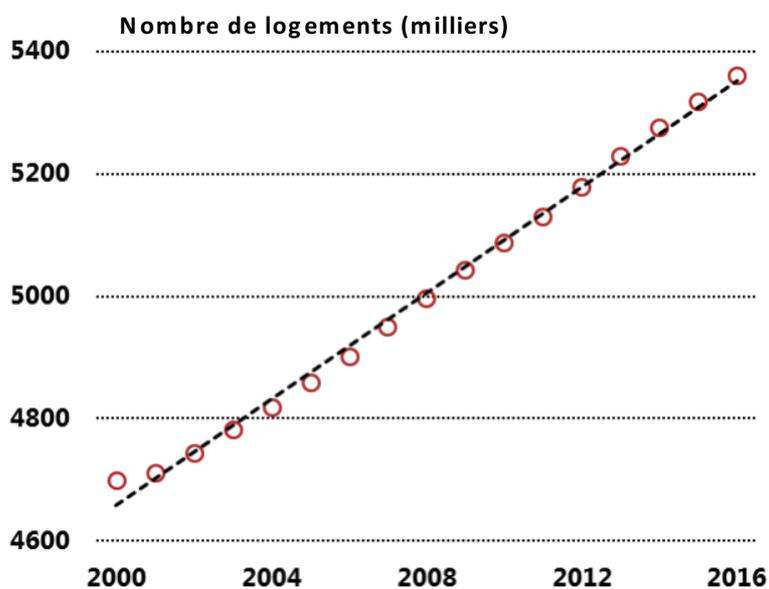


Figure 27 - Performance énergétique des logements - Source : calcul FABI

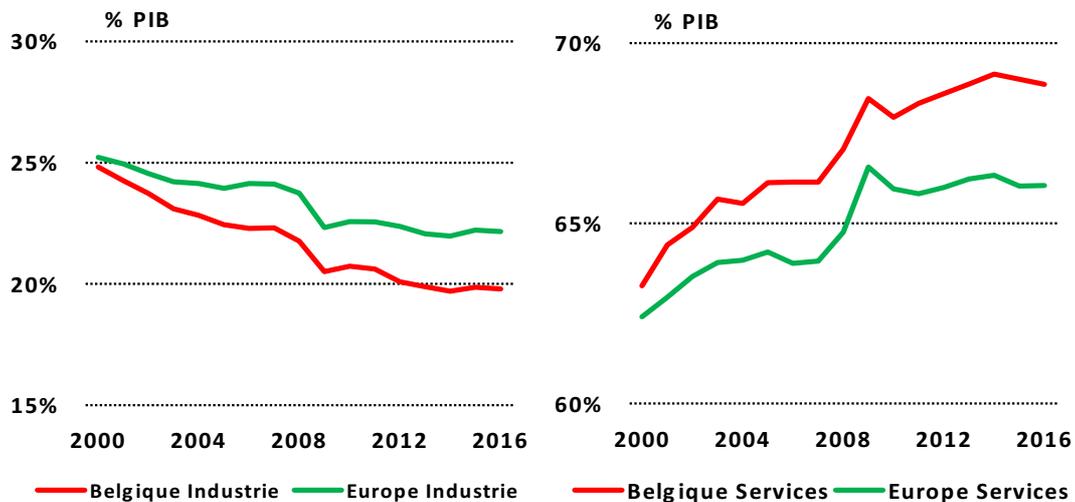
Le nombre de logements a augmenté de 0,8%/an depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle et ce de façon quasi linéaire (**Figure 28**). Le parc existant s’est ainsi accru de 41000 nouveaux logements par an depuis 2000.



**Figure 28 – Croissance du parc immobilier depuis 2000**  
*Source des données : STATBEL*

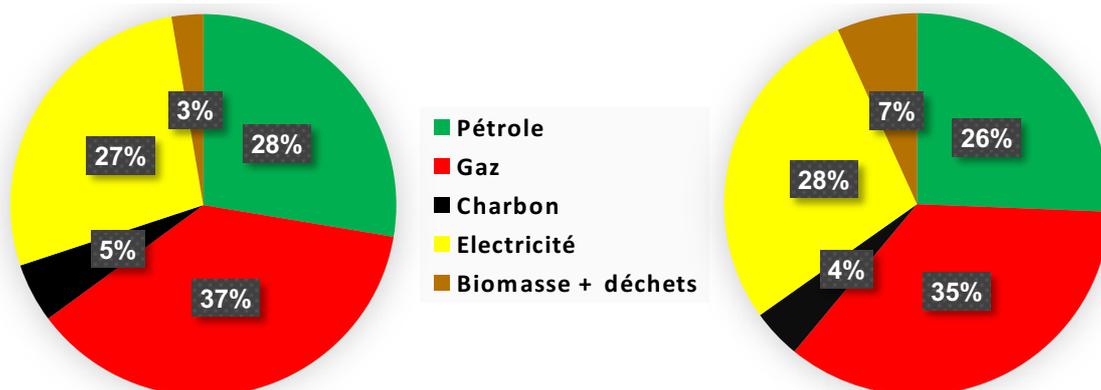
## INDUSTRIE

La part de l’industrie s’est significativement contractée en Belgique depuis 2000 au profit des services (**Figure 29**). En 2000, l’industrie représentait un quart du PIB belge. En 2016, elle ne comptait plus que pour 20%. Quant aux services, leur part a augmenté de façon continue passant de 63% en 2000 à 68% en 2016. Il y a donc eu globalement un glissement de 5% de l’industrie vers les services. Comparée à la moyenne européenne (22% d’industrie et 66% de services en 2016), la Belgique a davantage réduit son industrie au profit des services. Depuis la crise de 2008, on observe d’ailleurs une quasi-stagnation des parts industrie et service en Europe.



**Figure 29 – Evolution de l'industrie et des services en % PIB pour la Belgique et l'Europe**  
*Source des données : World Bank*

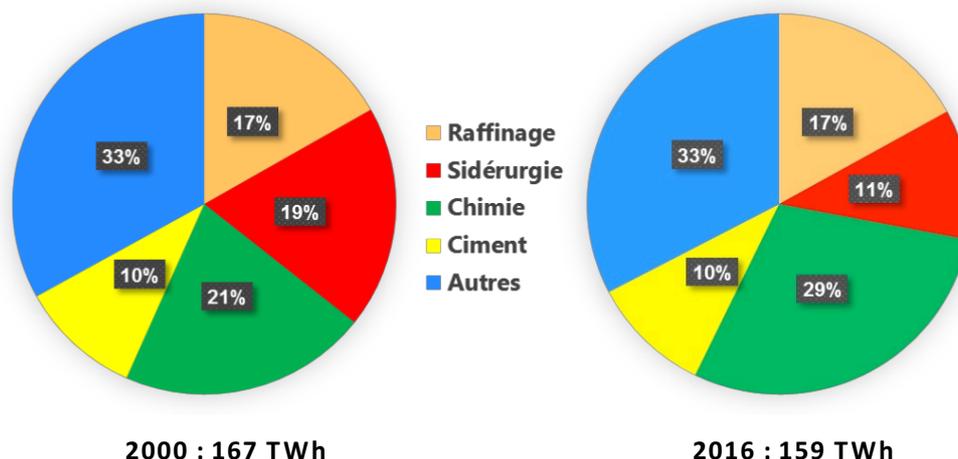
Entre 2000 et 2016, l'industrie belge a réduit sa consommation d'énergie finale de 5%. Elle représentait en 2016, 31% de la consommation d'énergie finale (**Figure 30**). Son intensité énergétique<sup>32</sup> a baissé dans le même temps de 2,6 MWh/k€ à 1,9 MWh/k€. Ceci est dû en grande partie au glissement de l'industrie lourde vers les services. Le mix industriel 2016 contenait 35% de gaz naturel, 28% d'électricité, 26% de pétrole, 7% de biomasse et 4% de charbon. Il n'a que faiblement évolué depuis 2000 avec un déplacement mineur du gaz (-2%), du pétrole (-2%), du charbon (-1%) vers l'électricité (+1%) et la biomasse (+4%).



**Figure 30 – Evolution du mix d'énergie finale par sources dans l'industrie entre 2000 et 2016**  
*Source des données : STATBEL*

<sup>32</sup> Compte tenu de son caractère énergivore, l'intensité énergétique de l'industrie est toujours nettement supérieure à celle des services.

Le mix industriel a été réparti en 4 usages principaux (**Figure 31**) : raffinage, chimie (incluant la consommation énergétique de la pétrochimie), sidérurgie/non ferreux et ciment. Ils comptaient en 2016 pour les deux tiers de l'énergie consommée dans l'industrie. Les autres usages (incluant principalement l'agro-alimentaire mais aussi le papier, la construction, les textiles et l'agriculture) ont été classés dans « autres ».

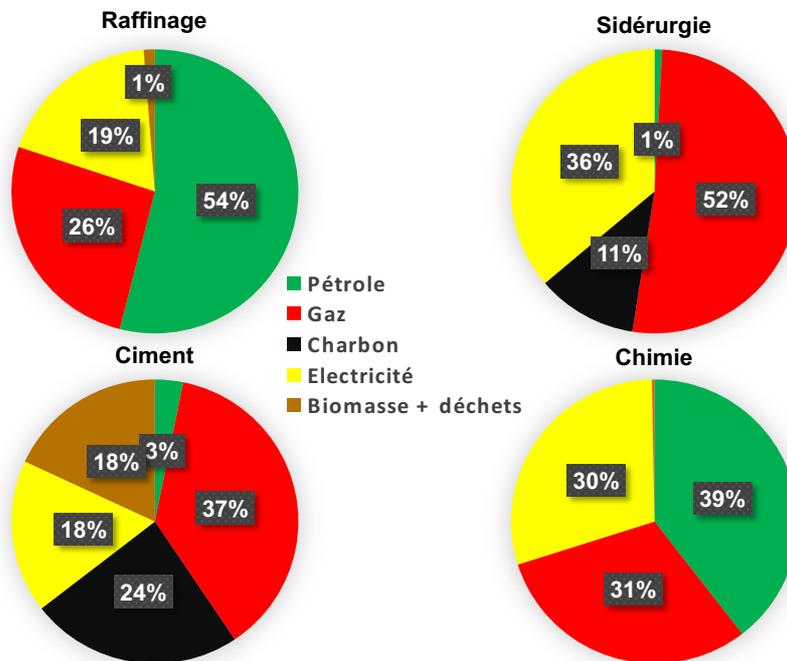


**Figure 31 – Evolution du mix d'énergie finale par usage dans l'industrie entre 2000 et 2016**

Source des données : STATBEL

Si les quatre usages principaux sont restés globalement constants, on observe un déplacement significatif d'énergie finale entre la chimie (+8%) et la sidérurgie (-8%).

Le mix 2016 de chacun des usages industriels est présenté dans la **Figure 32**. Sans surprise le raffinage est dominé par le pétrole et le gaz, la chimie et la sidérurgie par le pétrole, le gaz et l'électricité. Par contre, l'industrie cimentière n'utilise pratiquement plus de pétrole alors que le charbon y est toujours bien présent (24%). La biomasse et les déchets représentent 18% du mix cimentier.



**Figure 32 – Mix propre à chaque usage industriel**  
 Source des données : STATBEL

### PETROCHIMIE

La pétrochimie est une utilisation non énergétique des énergies fossiles, ces dernières étant transformées en matières plastiques via l'éthylène, le propylène et le polypropylène.

La pétrochimie représentait en 2016 19% de la consommation d'énergie finale c'est-à-dire 98 TWh (**Figure 33**). C'est 2% de plus qu'en 2000. La production pétrochimique belge repose essentiellement sur des produits pétroliers (naphta – 87%) et un peu de gaz (10%). Le charbon (moins de 3% y est devenu marginal). Les hydrocarbures utilisés en pétrochimie étant « transformés » et non « brûlés », en théorie ils n'émettent pas de gaz à effet de serre sauf au cours du procédé (la transformation elle-même consomme de l'énergie qui a été intégrée à la partie Chimie). Toutefois, les plastiques ne sont pas pour autant neutres sur le plan environnemental. Abandonnés dans la biosphère, ils se décomposent en microparticules au sein des océans et même des nappes phréatiques et sont ingérés par les poissons notamment.

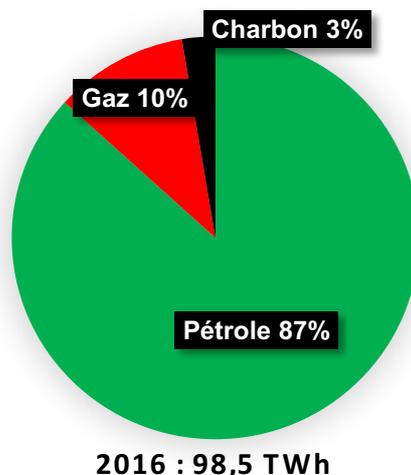


Figure 33 – Mix pétrochimique 2016 - Source des données : STATBEL



Nous utilisons et jetons chaque année l'équivalent de notre poids corporel en plastique. 40% sont dispersés de façon incontrôlée dans notre environnement. 35% sont regroupés et enfouis dans le sol. Leur destin n'est pas différent des déchets abandonnés. Ils finiront leur vie dans le sol, les nappes phréatiques et les océans. Le quart restant est réparti entre recyclage (15%) et incinération (10%). Mais, sur les 14% recyclés, moins de 2% le sont en circuit fermé (collecte, tri, décontamination et re-polymérisation<sup>33</sup>). Les plastiques dispersés mettront plus d'un siècle à se dégrader en nanoparticules.

Ces dernières auront alors toute latitude pour se répandre non seulement dans notre environnement mais aussi au sein même des organismes vivants. Les nanoparticules possèdent en effet la faculté de traverser les barrières tissulaires pour venir s'accumuler dans nos organes, tels que le foie, et d'en perturber à long terme le fonctionnement.

<sup>33</sup> <https://www.nouvelobs.com/planete/20180202.OBS1657/dechets-plastiques-la-dangereuse-illusion-du-tout-recyclage.html>

## SECONDE PARTIE : SCENARIOS PROSPECTIFS 2050

Trois scénarios horizon 2050 sont proposés dans cette étude : **Marmotte**, **Tortue** & **Lièvre**. Ils correspondent à une progression graduelle dans le changement du mix énergétique belge via la technologie et les comportements individuels.

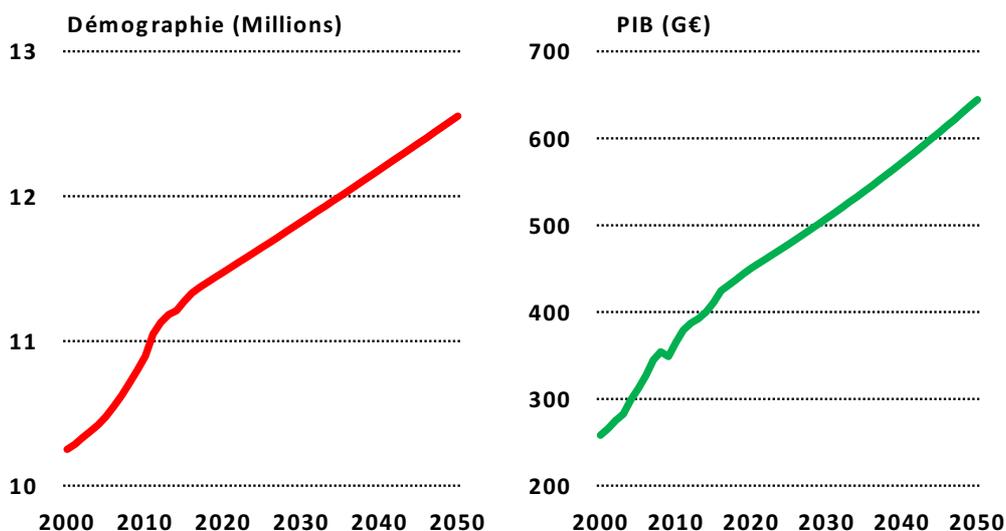
**Marmotte** prolonge sans modifications majeures l'évolution du mix actuel dans une démarche « *business as usual* ». Le scénario applique les propositions du projet de loi climat, notamment la sortie unilatérale du nucléaire à l'horizon 2025 remplacée par des cycles gaz combinés. Marmotte prolonge les tendances observées depuis le début du siècle en termes de transports en maintenant la croissance du nombre de voitures mais en continuant de réduire le kilométrage. La réduction de *passagers\*km* pour les voitures individuelles et des *tonnes\*km* pour les utilitaires sont déplacés vers le rail. Les véhicules thermiques ne sont que faiblement déplacés (-10%) vers les voitures électriques et les utilitaires au gaz naturel. La consommation des voitures diminue légèrement passant d'une moyenne de 6l/100 km à 5l/100 km. **Marmotte** ne rénove pas l'habitat belge pourtant très ancien et très dégradé et n'introduit pas d'hydrogène dans le mix énergétique. **Marmotte** continue néanmoins la mise en œuvre de renouvelables intermittents au rythme actuel pour atteindre 30% de la production d'électricité (20% d'éolien on et off-shore et 10% de solaire) en 2030. Enfin **Marmotte** fait croître la part de la biomasse au rythme actuel.

**Tortue** est le scénario central. Il repose sur un changement profond du mix énergétique belge à un rythme soutenu mais contrôlé ceci afin de ne pas perturber les grands équilibres socio-économiques. Il repose davantage sur la technologie que sur des changements de comportements individuels. Le parc de voitures individuelles et d'utilitaires ne croît plus et est maintenu à sa valeur 2016 tandis que la réduction du kilométrage est identique à **Marmotte**. Comme pour **Marmotte**, les *passagers\*km* et les *tonnes\*km* sont en partie déplacés vers le rail mais aussi vers le covoiturage. L'électricité pour les voitures individuelles et le gaz pour les utilitaires sont portés respectivement à 25% et 40%. Un plan ambitieux de rénovation de l'habitat est lancé tandis que, grâce à l'introduction massive de pompes à chaleur, les énergies fossiles y deviennent marginales. **Tortue** ferme les trois réacteurs nucléaires (2GW) les plus anciens sur la période 2030–2040 et introduit un peu de cogénération dans l'Industrie. La mise en œuvre des ENR (30%) et la croissance de la biomasse sont identiques à **Marmotte**.

**Lièvre** est le scénario le plus avancé. Il ajoute aux changements technologiques des changements sociétaux significatifs. Il superpose aux déplacements vers le rail et le covoiturage 20% de télétravail et/ou de coworking (un jour par semaine). Il introduit également une part significative de gaz et d'hydrogène pour les véhicules individuels. L'habitat est rénové de façon encore plus poussée tandis que les fossiles (gaz y compris) disparaissent du mix habitat au profit des pompes à chaleur. **Lièvre** fait sortir la Belgique de la génération nucléaire à l'horizon 2045 en trois phases : 2GW en 2033 (identique à **Tortue**), 2GW en 2040 et 2GW en 2045. Les énergies renouvelables intermittentes sont portées à 50% en 2040. Grâce à une meilleure synergie

industrielle, **Lièvre** utilise comme **Tortue** la cogénération pour réduire la consommation d'énergie dans l'industrie. La croissance de la biomasse est identique à **Marmotte** et **Tortue**.

Les données de croissances démographique (0,3% par an constant 2050) et économique (1,5% entre 2017 et 2020 et 1,2% constant entre 2020 et 2050) sont communes aux trois scénarios et reprises dans la **Figure 34**. Elles conduisent en 2050 à une population de 12,6 millions d'habitants et à un PIB de 645 milliards d'euros (contre 424 en 2016).



Données socio économiques		
Démographie 2017 - 2050		0,30%
Croissance économique	2017 - 2020	1,50%
	2020 - 2050	1,20%

**Figure 34 – Données démographiques et économiques**  
(Source des données : DGS & BFP)

La méthodologie consiste à utiliser le mix actuel et les tendances passées (dans la plupart des cas depuis 2000 et sur base des données extraites de la BDD STATBEL) pour calculer les évolutions futures des différentes sources d'énergie soit en poursuivant les tendances observées soit en les modifiant conformément aux hypothèses choisies pour chacun des scénarii. Les énergies finales sont calculées pour chacune des quatre applications élémentaires (transports, habitat, industrie et pétrochimie) et de la génération électrique prise en fait comme une application dans le mix final. Le mix primaire par source d'énergie est alors estimé à partir du mix final et du rendement des différentes générations électriques. Pour les renouvelables le mix final et le mix primaire sont indifférenciés. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont calculées en multipliant les quantités d'énergie fossiles primaires par leur coefficient d'émission (204 kg<sub>CO2</sub>/MWh pour le gaz naturel, 260 kg<sub>CO2</sub>/MWh pour le pétrole et 340 kg<sub>CO2</sub>/MWh pour le charbon)

L'ensemble a été développé sur EXCELL. Le tableau est conservé par le secrétariat général de la FABI.

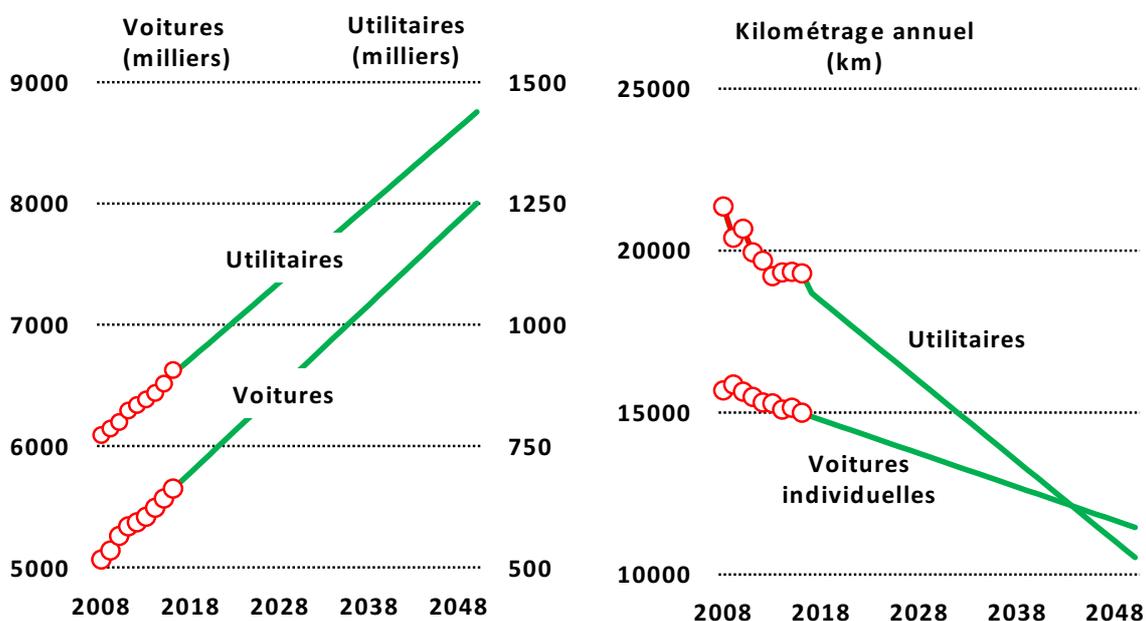


Selon l'équation de Kaya, les émissions de CO<sub>2</sub> progressent linéairement avec le nombre d'habitants. En effet plus d'habitants, c'est davantage de transports, de surface d'habitation à chauffer, de produits consommés provenant de l'industrie. Au niveau mondial, la démographie s'est accrue de plus de 40% au cours des 30 dernières années passant de 5,3 milliards d'individus en 1990 à 7,5 milliards en 2018. Si la démographie est un contributeur majeur à l'accroissement des émissions de CO<sub>2</sub>, il n'est cependant pas dans les objectifs de ce rapport de débattre sur les mesures à adopter pour en limiter la croissance.

**SCENARIO 1 : « MARMOTTE »**

**TRANSPORTS**

**Marmotte** suppose que les pratiques dans les transports suivent les tendances observées durant les dix dernières années. La voiture individuelle reste de mise pour le transport de personnes et les utilitaires pour le transport de marchandises.

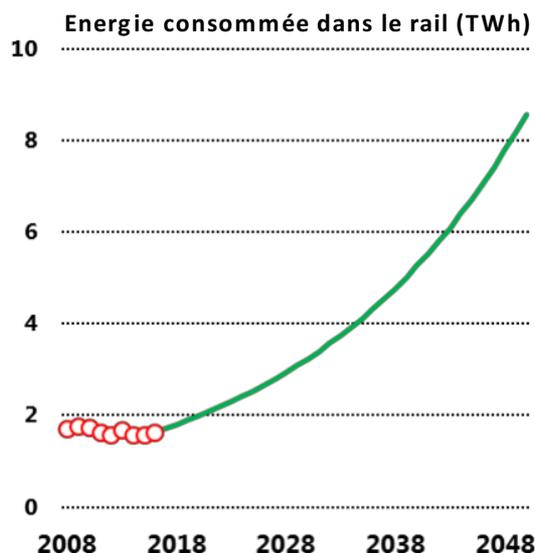


**Figure 35 – Evolution du nombre de véhicules et du kilométrage à l’horizon 2050**  
**Rouge : données historiques – Vert : scénario Marmotte**

Les principales hypothèses sont les suivantes (**Figure 35**) :

- Le nombre de voitures et d'utilitaires continue de progresser au même rythme que celui observé depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. Les véhicules individuels passent ainsi de 5,65 millions en 2016 à environ 8 millions en 2050 tandis que le nombre d'utilitaires passe de 900 000 à 1,45 millions.
- Par contre, grâce à une utilisation bien supérieure du rail pour les passagers (train sur les longues distances, tram électrique, métro et trolleybus en ville) mais aussi pour le fret (ferroutage), le kilométrage continue de se réduire en suivant la tendance observée depuis le début du siècle. Il passe d'un peu moins de 15 000 km à 11 850 km annuels pour les voitures et de 19 300 km à 10 500 km annuels pour les utilitaires.

Par contre **Marmotte** n'encourage pas le covoiturage et suppose que le coefficient de remplissage des voitures (1,54 en 2016) n'évolue pas au cours des 30 prochaines années. Pour compenser la baisse de kilométrage des véhicules, le rail augmente de 5% par an sur la période 2017 à 2050<sup>34</sup>. En 2050, le trafic passager est ainsi multiplié par 5 et celui du fret par 4. Suite à ce transfert, l'énergie consommée par les trains (considéré exclusivement comme électrique) passe de 1,6 TWh en 2016 à 8,6 TWh en 2050 (**Figure 36**)



**Figure 36 - Augmentation d'énergie consommée dans le rail**  
**Rouge : données historiques – Vert : scénario Marmotte**

- Seulement 10% des voitures thermiques sont déplacées vers les voitures hybrides HEV et/ou électriques tandis que 10% des utilitaires sont convertis au gaz (**Figure 37**). La progression est faible sur la période 2020-2030 puis s'accélère à partir de 2030. En 2050 le parc belge contient 185 000 voitures hybrides, 60 000 voitures électriques et 150 000 utilitaires au gaz. **Marmotte** ne considère pas d'hydrogène dans le mix 2050.

<sup>34</sup> Pour le calcul du coefficient de remplissage voir Annexe 5

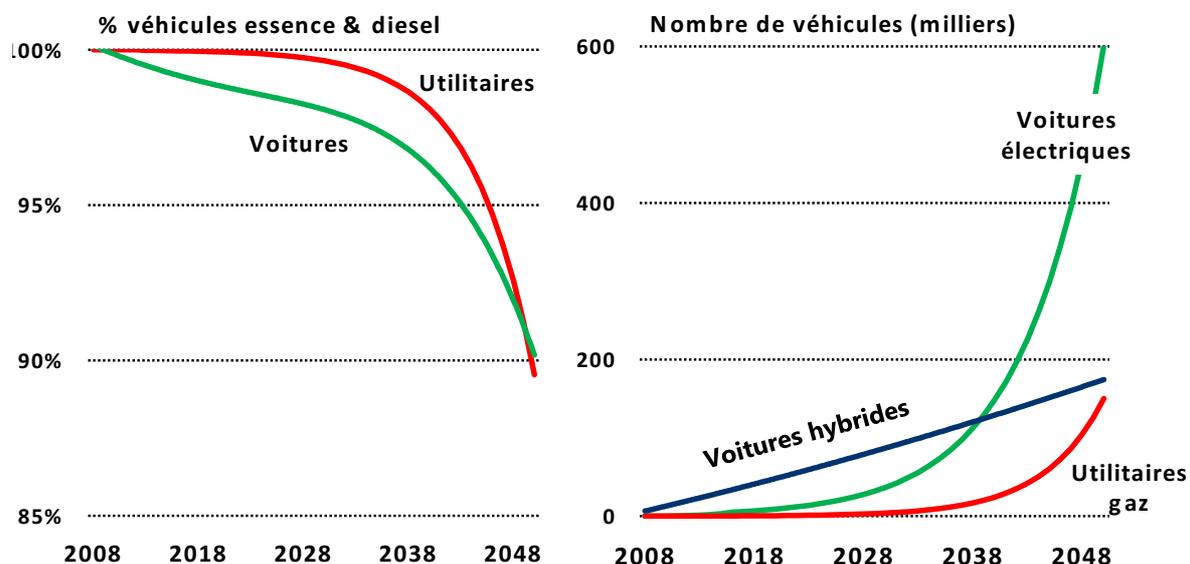
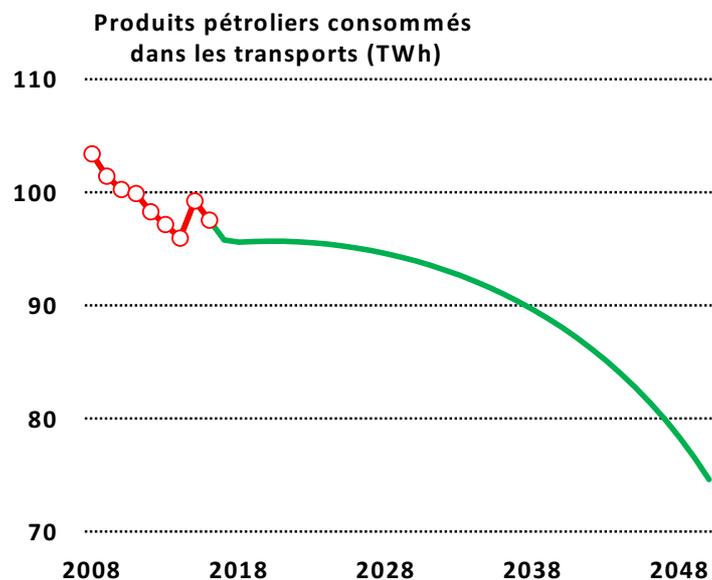


Figure 37 - Evolution du parc de véhicules  
Scénario *Marmotte*



Les moteurs thermiques conventionnels peuvent encore faire l'objet d'améliorations incrémentales. Par contre, il reste une grande marge de progrès dans le choix du carburant. Le diesel est actuellement banni au profit de l'essence en raison des émissions de particules fines et de NOx. En réalité les NOx sont produites par l'injection directe et la décomposition imparfaite des longues chaînes hydrocarbonées contenues dans les combustibles liquides. Ce problème frappe également les moteurs à essence qui émettent en outre plus de CO<sub>2</sub> en raison de leur moindre rendement. Aussi, le GNC (Gaz Naturel Comprimé) est une solution attrayante particulièrement pour les poids lourds. Son utilisation réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 20 à 30% et supprime quasiment les NOx. A titre transitoire, on pourrait recourir au LPG qui offre des avantages proches de ceux du GNC en matière de particules fines et de NOx. Notons enfin que l'utilisation de l'électricité pour les poids lourds a été écartée de cette étude. Bien que techniquement possible, elle est difficilement envisageable compte tenu de la puissance requise (entre 500 et 1000 CV soit entre 370 et 740 kW) qui demanderait de construire des batteries de taille démesurée.

Le scénario **Marmotte** considère que les principaux leviers de réduction de la consommation des voitures thermiques ne sont que faiblement activés. Ainsi la vitesse sur autoroute n'est pas réduite, le nombre de SUV continue de croître aux dépens des berlines profilées et le poids des véhicules n'est que marginalement réduit. Toutefois grâce au digital, la consommation moyenne des voitures thermiques passe sur la période 2020 à 2050 d'une moyenne de 6,4 l/100km en 2016 à 5l/100km en 2050. La consommation des utilitaires qui ne s'est pas vraiment réduite au cours des 10 dernières années reste sur l'ensemble de la période constante à 32l/100km pour les véhicules thermiques et 29,7 kg/100km pour les véhicules au gaz. Quant aux voitures électriques la baisse « technique » de la consommation est compensée par l'accroissement de leur poids (notamment des batteries) pour satisfaire de plus longues distances. Une consommation moyenne de 15 kWh/100km a été retenue.

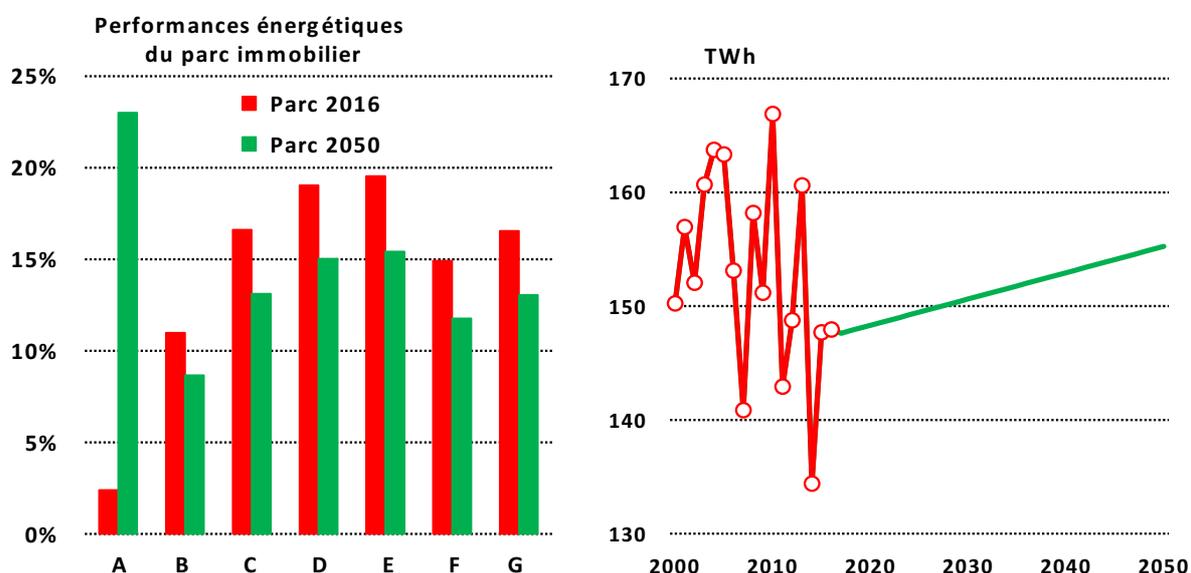


**Figure 38 - Consommation des produits pétroliers dans les transports.**  
**Rouge - Données historiques – Vert : scénario Marmotte**

Grâce à la réduction du nombre de km parcourus, la consommation pétrolière dans les transports poursuit sa décroissance surtout à partir des années 2030 quand le parc de voitures électriques et d'utilitaires au gaz devient significatif. Elle se réduit de 25% passant de 98 TWh en 2016 à 75 TWh en 2050 (Figure 38).

**HABITAT**

Le scénario **Marmotte** considère que le rythme des nouvelles constructions suit la même tendance que celui observé depuis le début du siècle (**Figure 28**) ce qui conduit à 1,42 millions logements supplémentaires à l’horizon 2050. Ces nouveaux bâtiments étant construits avec la RT (Règlementation Thermique) en vigueur sont classés en catégorie A (consommation annuelle <math>50\text{kWh/m}^2</math>). Par contre, **Marmotte** ne considère pas de rénovation de l’habitat ancien qui est maintenu dans son état actuel. La surface moyenne par logement reste égale à  $82\text{ m}^2$  ce qui, compte tenu de la croissance du nombre de bâtiments et de la faible croissance démographique, accroît la surface par occupant qui passe de  $38\text{ m}^2$  en 2016 à  $44\text{ m}^2$  en 2050 soit une augmentation de 15%.



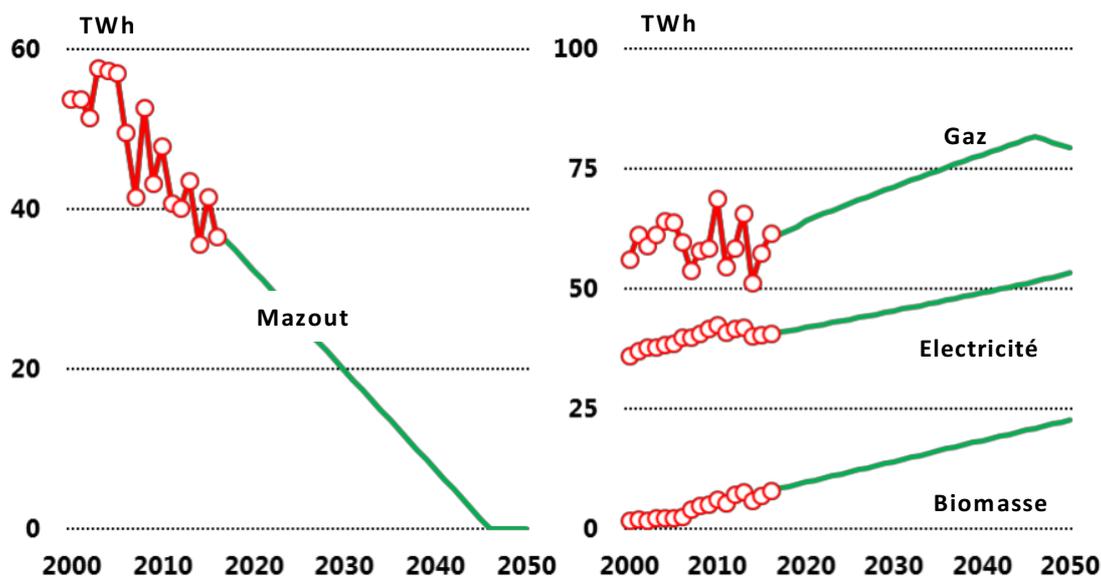
**Figure 39 – Evolution du parc immobilier. Comparaison 2016 et 2050.**

**Evolution de l'énergie finale dans l'habitat**

**Rouge : données historique – Vert : scénario Marmotte**

Ces hypothèses conduisent en 2050 à un parc immobilier possédant 23% de logements de classe A (**Figure 39 - gauche**). Bien qu’une réduction relative de l’ensemble des autres classes soit observée, en absolu la consommation énergétique du parc immobilier augmente continûment au rythme de mise en œuvre des nouvelles constructions qui, bien qu’économiques, rajoutent un peu de consommation énergétique supplémentaire au parc existant. La consommation finale de l’habitat passe ainsi de 148 TWh en 2016 à 155 TWh en 2050 (**Figure 39 – droite**).

Au niveau du mix, on suppose une sortie définitive du charbon dès 2021 tandis que la part du mazout continue de se réduire au rythme observé depuis le début du siècle (**Figure 40**). Il en résulte une sortie définitive du mazout dans l'habitat en 2046.



**Figure 40 – Evolution de la consommation de mazout, de gaz, d'électricité et de biogaz dans l'habitat**  
Rouge – Données historiques – Vert : scénario *Marmotte*

En 2016, la chaleur (chauffage + eau chaude) comptait environ pour 72% de la consommation énergétique totale dans l'habitat<sup>35</sup>. Elle comprenait principalement du mazout, du gaz et de l'électricité mais aussi de la biomasse et encore un peu de charbon - **Figure 24**). Le solde (soit 28% -cuisson des aliments, éclairage, électroménager, applications digitales) est lui presque exclusivement aujourd'hui consommé à partir d'électricité. Cette répartition se retrouve au niveau du mix habitat.

<sup>35</sup> <https://travaux.edf.fr/electricite/raccordement/repartition-de-la-consommation-d-electricite-au-sein-d-un-foyer-francais>

Au niveau qualitatif, **Marmotte** considère que les nouveaux logements sont équipés de Pompes à Chaleur (PAC) aérothermiques<sup>36,37</sup> consommant en moyenne 6 MWh/an ce qui conduit à un parc d'un peu plus d'un million et demi de PAC à l'horizon 2050 (**Figure 41 - droite**). L'introduction des PAC ne joue toutefois que marginalement sur la consommation de chaleur dans l'habitat. Elle passe de 20,5 MWh/an à 19,5 MWh/an (**Figure 41 - gauche**).

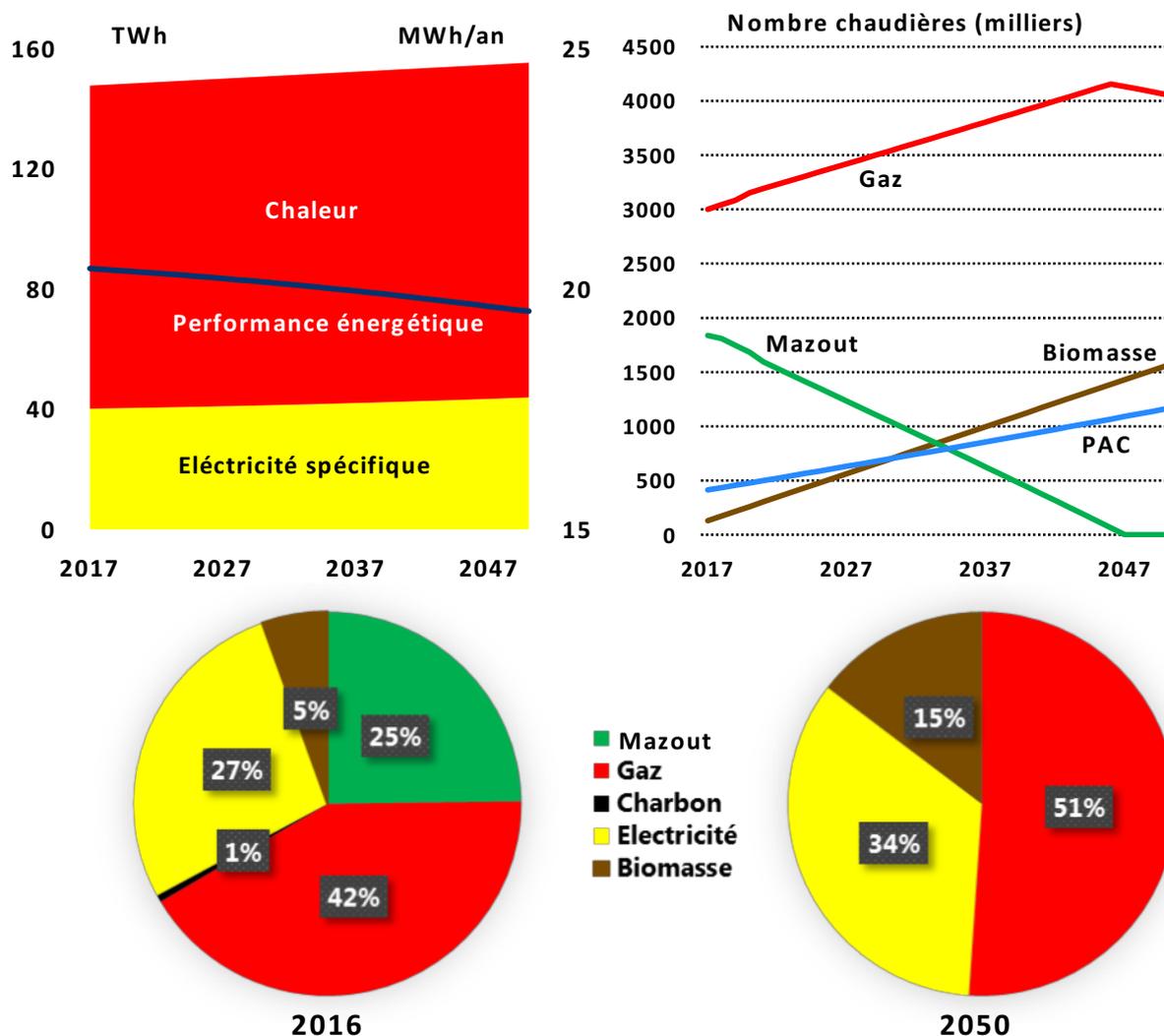


Figure 41 – Evolution du mix habitat. Scénario *Marmotte*

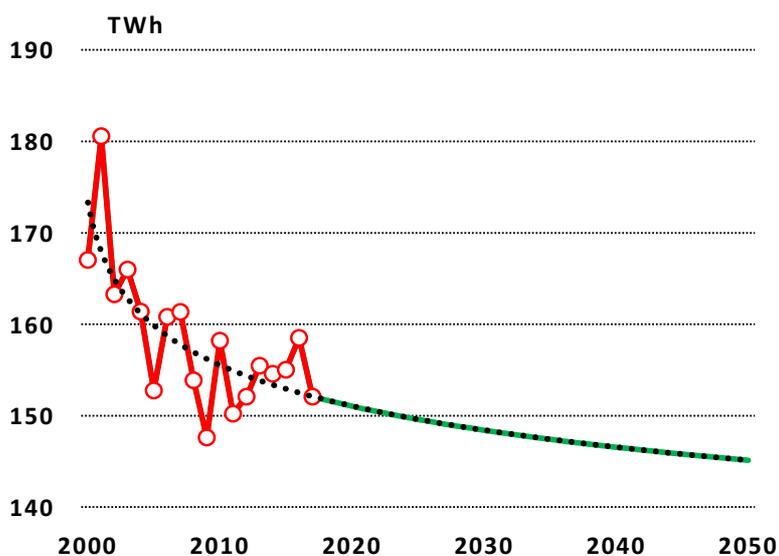
<sup>36</sup> Une pompe à chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un milieu à basse température (source froide) vers un milieu à haute température (source chaude). Il inverse le sens naturel du transfert spontané de l'énergie thermique. La source froide peut être l'air ambiant (PAC aérothermique) mais aussi le sous-sol (PAC géothermique).

<sup>37</sup> Les pompes à chaleur géothermiques n'ont pas été considérées dans ce rapport compte tenu de leur coût de mise en œuvre (coût du puits géothermique)

La partie non calorifique de l’habitat (aussi appelée « *électricité spécifique* ») augmente elle aussi. Elle passe de 40 TWh en 2016 à 44 TWh (+10%) à l’horizon 2050. Cet accroissement résulte de l’augmentation du parc, mais aussi d’une progression du nombre d’équipements électroménagers et informatiques ainsi que du déplacement des dernières cuisinières au gaz vers une cuisson 100% électrique. **Marmotte** ne considérant pas de rénovation de l’existant n’intègre pas de domotique dans l’habitat. De ce fait, il ne peut améliorer son efficacité énergétique. Dans l’existant, la réduction du nombre de chaudières au mazout se fait au profit du gaz et de la biomasse. Leur part augmente au même rythme que celui observé au cours des dix dernières années. En 2050, l’habitat belge est chauffé avec 23% de PAC, 60% de chaudières au gaz et 17% de chaudières fonctionnant à la biomasse<sup>38</sup> (**Figure 41**). En 2050, le gaz (+9%) représente plus de la moitié de l’énergie consommée dans l’habitat contre 34% pour l’électricité (+7%) et 15% pour la biomasse dont la part a été multipliée par trois.

## INDUSTRIE

**Marmotte** prolonge jusqu’en 2050 la tendance baissière de consommation d’énergie observée dans l’industrie depuis le début du siècle (**Figure 42**).



**Figure 42 – Evolution de la consommation d’énergie dans l’industrie belge**  
Rouge : données historiques. Vert : scénario **Marmotte**

Le scénario ne considérant pas de rupture technologique majeure à moyen terme, ce déclin est simplement soutenu par une amélioration incrémentale de l’efficacité énergétique dans les procédés et les organisations industriels. La consommation totale passe ainsi de 158 TWh en 2016 à 145 TWh en 2050. Par ailleurs, hormis la sortie programmée du charbon dès le début des

<sup>38</sup> Bois + biogaz

années 2020, le déplacement des hydrocarbures vers l'électricité reste limité dans la mesure où, dans de nombreux secteurs comme le raffinage, la sidérurgie, les non ferreux, le verre et le ciment, ce déplacement est techniquement difficile voire impossible



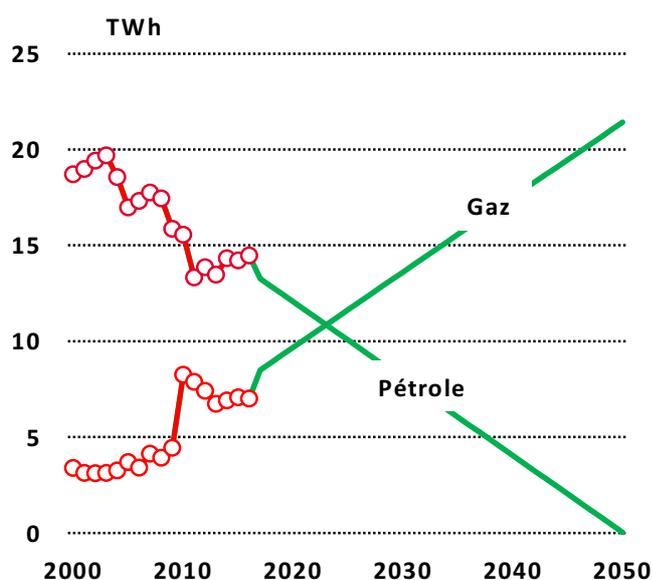
Un procédé sidérurgique de rupture est en cours de développement en Suède<sup>39</sup>. Appelé **HYBRIT**, il vise à remplacer la voie classique de production de fonte en haut-fourneau (basée sur la réduction à haute température du minerai de fer par du coke) par une réduction du minerai de fer par l'hydrogène. L'hydrogène serait produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies non-fossiles (nucléaire, renouvelable, hydraulique). Ce procédé permettrait d'obtenir une fonte sans émission de CO<sub>2</sub>. Une unité pilote est actuellement en cours de développement pour valider à la fois sa faisabilité technique et économique. Ce projet est conduit par 3 partenaires industriels suédois (sidérurgie, mine de fer et producteur d'électricité).

---

<sup>39</sup> <http://www.hybritdevelopment.com/>

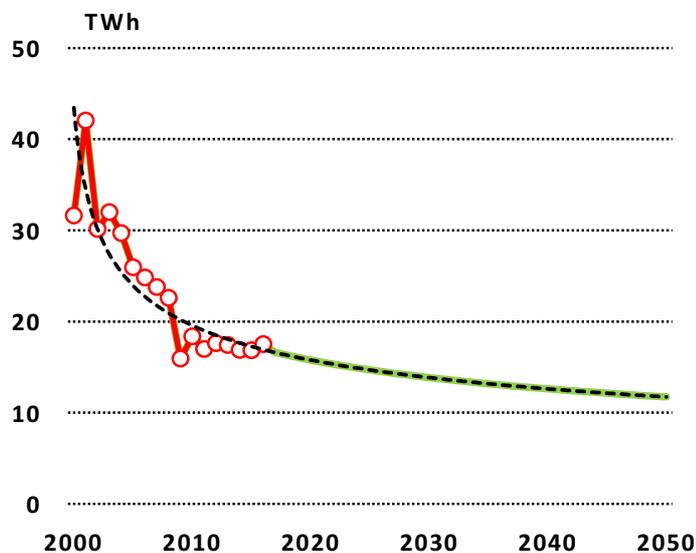
Par type d'industrie, les tendances suivantes sont observées :

- Dans le raffinage, la consommation se maintient au niveau moyen 2000 à 2016. Le déplacement du pétrole vers le gaz entamé depuis le début du siècle se poursuit au même rythme. A l'horizon 2050, le pétrole a disparu du raffinage (**Figure 43**Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.).



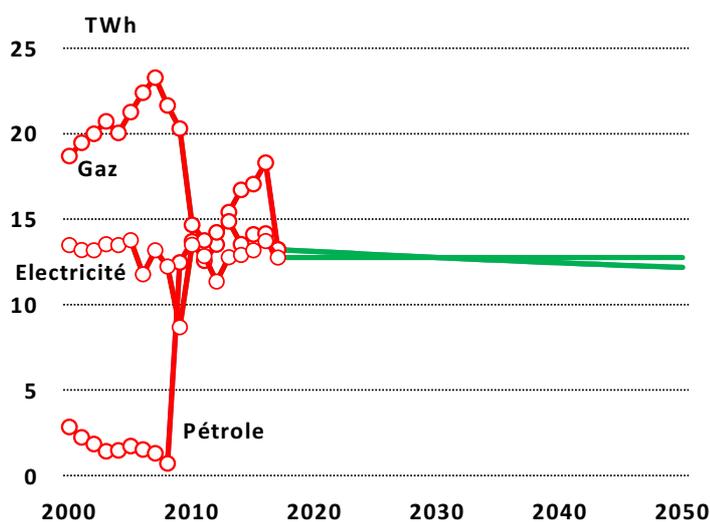
**Figure 43- Evolution du mix pétrole/gaz dans le raffinage**  
 Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte*

- Pour la sidérurgie, *Marmotte* suppose une sortie de charbon dès 2021 et un mix évoluant rapidement vers 50% de gaz et 50% d'électricité. La sidérurgie ayant fortement amélioré ses procédés au cours des 30 dernières années grâce à la « coulée continue », les réserves d'efficacité énergétique y sont pour l'instant limitées. La baisse de la consommation d'énergie résulte donc surtout d'une baisse modérée de l'activité (**Figure 44**).



**Figure 44 - Evolution de la consommation d'énergie dans la sidérurgie**  
**Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte***

 **Marmotte** suppose que la consommation d'énergie dans l'industrie chimique & pétrochimique reste stable à 40 TWh avec un mix à peu près uniformément réparti entre le pétrole (dont la part a fortement augmenté au cours des dernières années), le gaz (dont la part s'est réduite en proportion) et l'électricité (**Figure 45**).



**Figure 45 – Consommation d'énergie dans la chimie & pétrochimie**  
**Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte***

- La consommation d'énergie dans l'industrie cimentière est maintenue constante à son niveau moyen 2000 à 2018. Le pétrole (très faible aujourd'hui) et le charbon y disparaissent dès 2021. Ils sont compensés par une croissance du gaz.

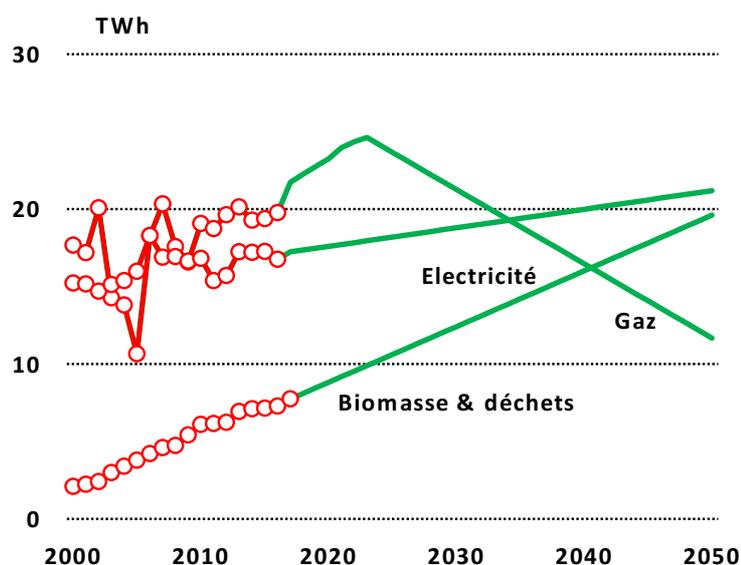


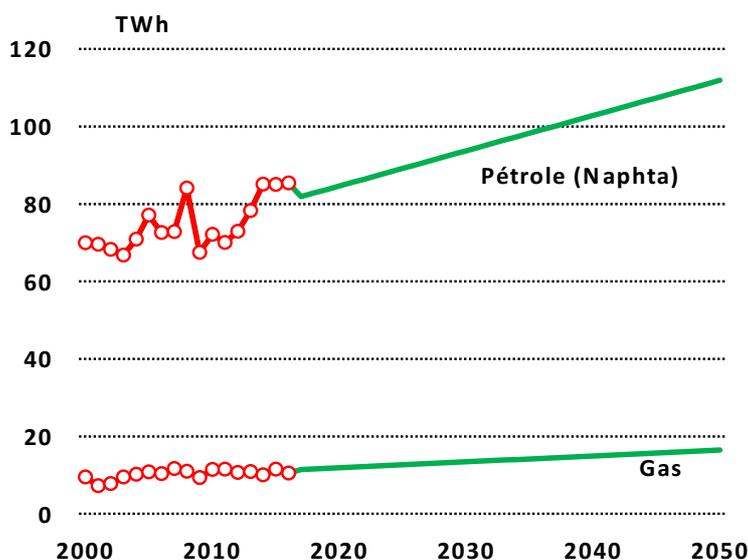
Figure 46 – Evolution du mix dans « autres applications »  
Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte*

- La consommation d'énergie dans les « autres applications » et notamment dans l'agro-alimentaire reste stable quantitativement. Comme pour les autres applications industrielles la sortie du pétrole (très peu présent aujourd'hui) et du charbon sont programmées dès 2021. L'électricité et la biomasse évoluent selon les tendances observées depuis le début du siècle. La sortie simultanée du pétrole et du charbon en 2021 nécessite de faire croître la part du gaz durant quelques années mais assez rapidement celle-ci peut être réduite grâce à la progression de l'électricité et de la biomasse (Figure 46).

Selon le scénario *Marmotte*, le mix industriel 2050 comprend 8% de pétrole, 41% de gaz, 34% d'électricité et 16% de biomasse. Par rapport à 2016, les parts du pétrole (-18%) et du charbon (-4%) ont fortement diminué au profit du gaz (+6%), de l'électricité (+6%) et de la biomasse (+8%).

**PETROCHIMIE**

**Marmotte** extrapole linéairement à partir du trend 2000/2016 l'utilisation de fossiles non énergétiques dans la pétrochimie (**Figure 47**). Le scénario suppose également une sortie du charbon en 2021. Ces hypothèses conduisent en 2050 à des consommations pétrolière et gazière de 112 TWh et 16 TWh à l'horizon 2050. **Tortue** et **Lièvre** utilisent les mêmes hypothèses que **Marmotte** en pétrochimie.

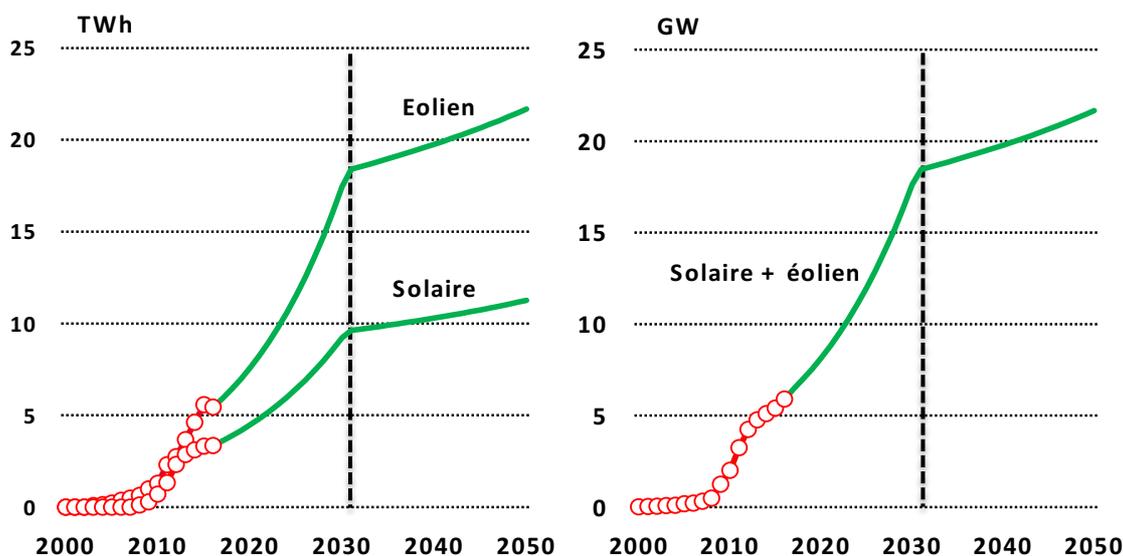


**Figure 47 – Evolution des combustibles fossiles non énergétiques en pétrochimie**  
**Rouge : données historiques – Vert : scénario Marmotte**

**GENERATION ELECTRIQUE**

Le scénario « **Marmotte** » repose sur deux hypothèses principales : une sortie complète de la génération nucléaire existante (soient environ 6 GW) en 2025 au profit de centrales à gaz CC (décision politique) et la poursuite de la politique actuelle de mise en œuvre des énergies renouvelables pour atteindre en 2030, 30% de production finale d'électricité (20% d'éolien et 10% de solaire photovoltaïque).

La cible « 30% renouvelable » est atteinte en 2030 (la directive européenne vise 32% – voir **Annexe 1**) puis maintenue (ce qui justifie la légère croissance 2030-2050) jusqu'en 2050 (**Figure 48 - gauche**). Elle conduit à une production renouvelable cumulée de 33 TWh à l'horizon 2050 (**Figure 48 - gauche**).

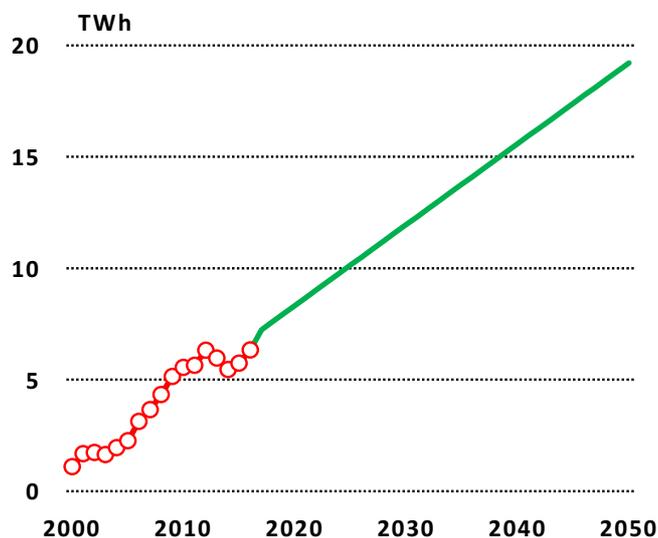


**Figure 48 – Gauche - Production d'énergie solaire et éolienne**  
**Droite – Puissance éolienne et solaire cumulée**  
**Rouge - Données historiques – Vert : scénario *Marmotte***

Le scénario **Marmotte** conduit à un accroissement modéré de la demande électrique. Il passe de 87 TWh en 2016 à 113 TWh en 2050 soit une progression de 30%. Il est principalement dû à la croissance du rail, à l'introduction de 10% de voitures électriques, à la mise en œuvre de PACs dans le nouvel habitat ainsi qu'à un déplacement de certains procédés dans l'industrie. Pour satisfaire ces objectifs, l'éolien devra croître de 8,3% par an et le solaire de 7,5% par an durant la prochaine décennie. Les facteurs de charge retenus (2,21 TWh/GW pour l'éolien et 0,95 TWh/GW pour le solaire) conduisent à une puissance cumulée 2050 éolien + solaire de 22 GW (soit 3,5 fois la puissance nucléaire). En termes d'équipements cela correspond à 11000 éoliennes équivalentes de 2MW.



Dans le scénario **Marmotte**, on suppose sortir du nucléaire en 2025. Les unités nucléaires ont été mises en service successivement en 1975 (Doel 1 & 2, Tihange 1), en 1982 et 1983 (Doel 3 et Tihange 2) puis en 1985 (Doel 4 et Tihange 3). Prolonger l'exploitation de ces unités jusqu'en 2050, représenterait une durée d'exploitation de 75 ans pour les plus anciennes et de 65 ans pour les plus récentes. Une telle durée de vie nécessitera des investissements importants afin de maintenir les performances et le niveau de sûreté. En France on estime que le « *Grand Carénage* » en vue de prolonger de 30 ans la vie des 58 réacteurs nucléaires coûtera de l'ordre de 55 milliards d'euros<sup>40</sup> soit environ un milliard d'euros par réacteur. Au prolongement de la vie des réacteurs, le traitement et le stockage des déchets restent pour le nucléaire une externalité négative.



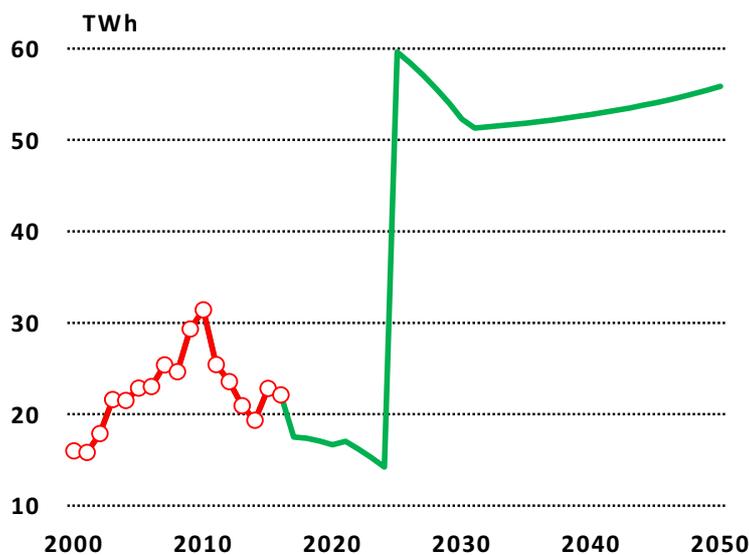
**Figure 49- Croissance de la biomasse dans la génération électrique**  
Rouge - Données historiques – Vert : scénario **Marmotte**

La part de la biomasse (biogaz pour l'essentiel) augmentera significativement. Le scénario **Marmotte** suppose une production de l'ordre de 20 TWh à l'horizon 2050. (**Figure 49**)

<sup>40</sup> [www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/notes/2016/note\\_information\\_grand-carenage\\_20160519\\_vf.pdf](http://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/notes/2016/note_information_grand-carenage_20160519_vf.pdf)



Le gaz de mine (Coal Mine Methane) est du méthane qui se désorbe naturellement de veines de charbon et s'accumule librement dans des anciennes galeries de mines où il peut être capté ou pompé. Il peut être valorisé soit directement sous forme de gaz (injection dans le réseau de transport, vente à un client industriel local) soit sous forme d'électricité verte. La démarche carbone est semblable au biogaz : on remplace des émissions fugitives de méthane par des émissions de CO<sub>2</sub> dont le pouvoir de réchauffement global (global warming potential) est 25 fois plus faible. Depuis Mai 2019, une installation de 3MW est exploitée par la société Gazonor Benelux<sup>41</sup> sur la Concession d'Anderlues. La captation du gaz de mine sur un ancien puits permet d'alimenter en électricité 15 000 habitants. Sur ce premier site, les réserves de gaz récupérable) s'élèvent à 277 millions de m<sup>3</sup>. Une dizaine de sites ont été identifiés en Wallonie et en Flandre.



**Figure 50 – Part du gaz dans la génération électrique**  
Rouge - Données historiques – Vert : scénario *Marmotte*

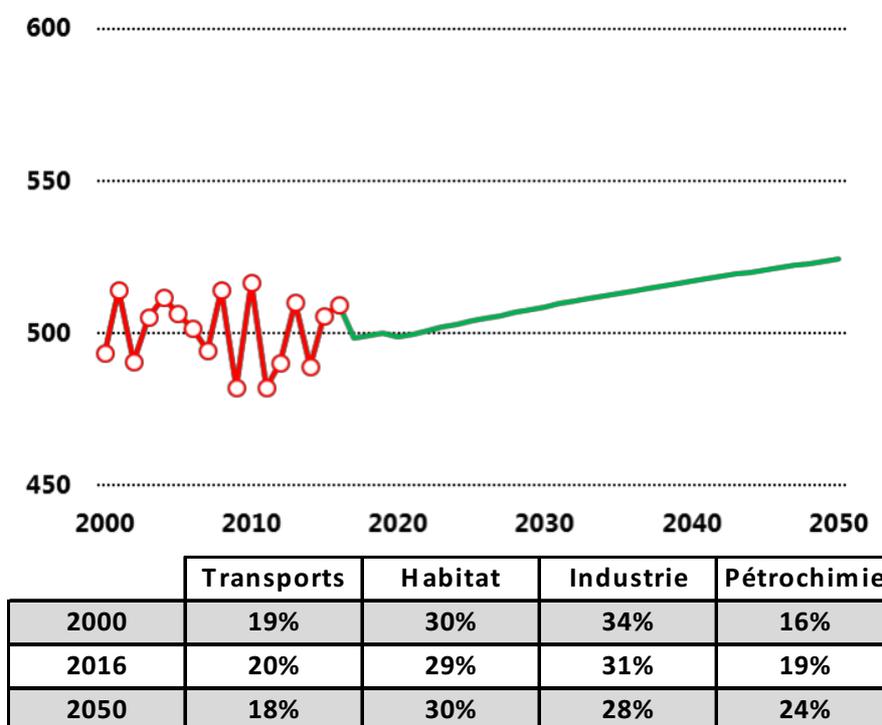
La sortie du nucléaire augmente de façon très significative la part du gaz qui passe de 22 TWh en 2016 à 56 TWh en 2050 (**Figure 50**). La production électrique 2050 se compose de 50% de gaz, 29% d'éolien et de solaire et 17% de biomasse. Le « *prix à payer* » pour sortir du nucléaire est donc une augmentation du gaz dans la génération électrique.

<sup>41</sup> <https://www.francaisedelenergie.fr>

**USAGES FINAUX & ENERGIE PRIMAIRE**

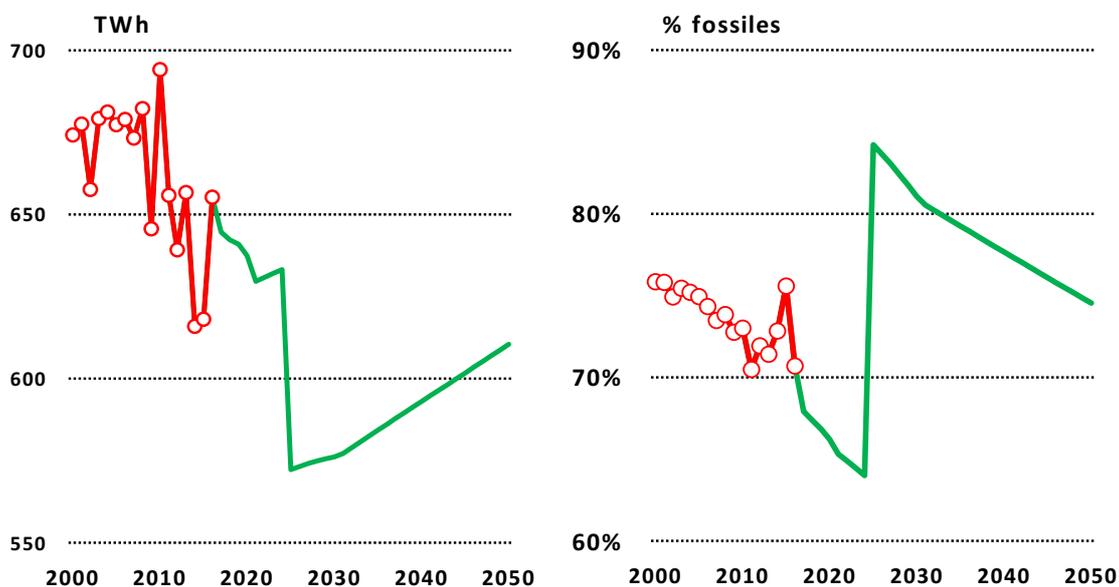
Compte tenu des hypothèses très conservatrices, la consommation d'énergie finale du scénario **Marmotte** reste quasi stable. Elle passe de 508 TWh à 524 TWh au cours de la période 2017 à 2050 (**Figure 51**).

Par usage, la part de l'énergie finale se réduit dans les transports (suite à la réduction du kilométrage et de la consommation) et l'industrie, reste quasi stable dans l'habitat mais augmente mécaniquement dans la pétrochimie (**Figure 51**).



**Figure 51 – Evolution de l'énergie finale**  
**Rouge : Données historiques – Vert : Scénario Marmotte**

Grâce au déplacement de la génération électrique du nucléaire vers le gaz CC dont le rendement est nettement supérieur (33% à 59%), le scénario **Marmotte** réduit la consommation d'énergie primaire de 655 TWh en 2016 à 610 TWh en 2050<sup>42</sup> (**Figure 52 - gauche**).



**Figure 52 – Gauche : consommation d'énergie primaire  
Droite : part des énergies fossiles dans le mix primaire  
Rouge : données historiques - Vert : scénario Marmotte**

En absolu, grâce à la sortie du mazout dans l'habitat et à la réduction du kilométrage dans les transports, la consommation de pétrole décroît de 263 TWh à 199 TWh. Par contre suite à la sortie du nucléaire, la consommation de gaz s'accroît de 55% passant de 166 TWh en 2016 à 256 TWh en 2050.

En part du mix, **Marmotte** accroît significativement la part des énergies fossiles qui passe de 70% en 2016 à 75% en 2050 avec un pic égal à 84% suite à la sortie brutale du nucléaire en 2025 (**Figure 52**). En supposant les prix du gaz et du pétrole constant à respectivement 8 US\$/MBTU<sup>43</sup> et 60 US\$ la facture belge d'énergies fossiles reste quasi stationnaire entre 13 et 14 Milliards d'Euros/an sur l'ensemble de la période. Le scénario **Marmotte** ne contribue donc pas à réduire la dette souveraine belge fortement corrélée à ses importations de combustibles fossiles.

<sup>42</sup> Incluant 8 TWh d'importations nettes d'électricité.

<sup>43</sup> BTU signifie British Thermal Unit. 1 Million de BTU est environ égal à 0,293 MWh

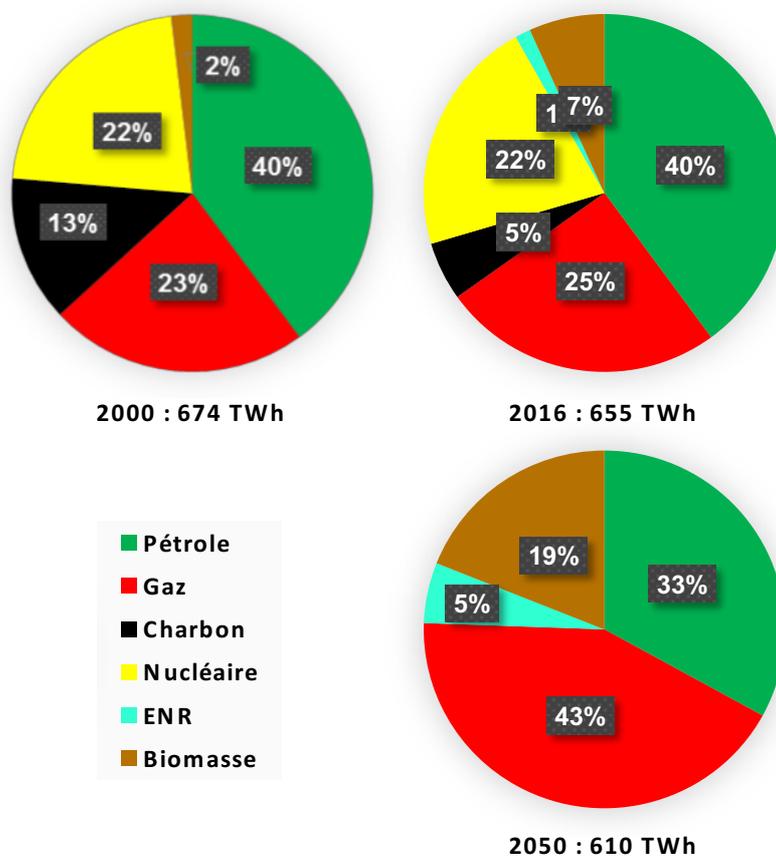


Figure 53 – Mix énergétique primaire - Scénario *Marmotte*

Le scénario *Marmotte* débouche sur un mix énergétique primaire 2050 (Figure 53) composé de 33% de pétrole, 43% de gaz, 5% de renouvelables et 19% de biomasse.

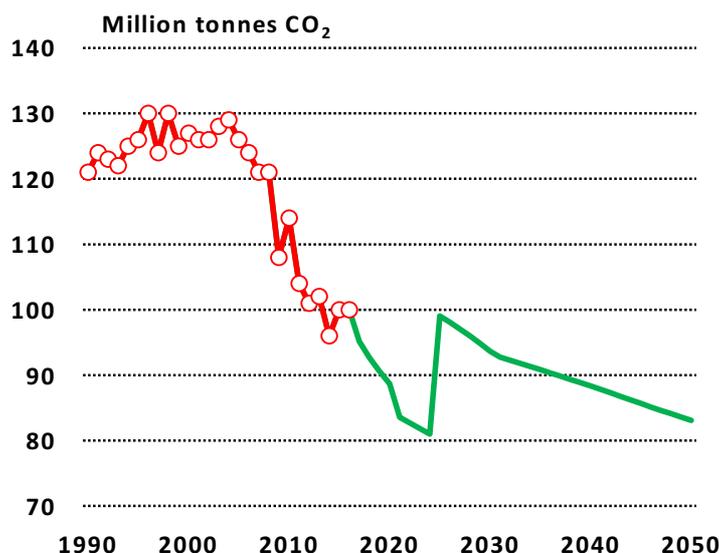
Cette répartition confirme les hypothèses « *business as usual* » de *Marmotte* avec une évolution fortement impactée par la sortie du nucléaire. Les énergies fossiles restent largement prépondérantes dans le mix.

#### EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

Grâce à la sortie du charbon en 2021, au déclin du mazout dans l’habitat et à la réduction du kilométrage des voitures, *Marmotte* continue de réduire à un rythme soutenu (Figure 54) les émissions de Gaz à Effet de Serre jusqu’en 2025 (81 Mt<sub>CO2</sub>). Mais, suite à la sortie du nucléaire et au déplacement vers le gaz, les émissions remontent en 2025 à leur niveau 2016 (99 Mt<sub>CO2</sub>). Toutefois sur la période 2025 à 2050, la réduction de la consommation dans les transports

permet de re-contracter les émissions de 17 Mt<sub>CO2</sub>. Entre 1990 (121 Mt<sub>CO2</sub>) et 2050 (83 Mt<sub>CO2</sub>), les émissions belges auront baissé de 30%. Entre 2016 (100 Mt<sub>CO2</sub>) et 2050, cette réduction est seulement de 19%.

**Marmotte** est évidemment très éloigné à la fois des objectifs européens et du projet de loi climat.



**Figure 54 – Evolution des émissions de CO2**  
Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte*



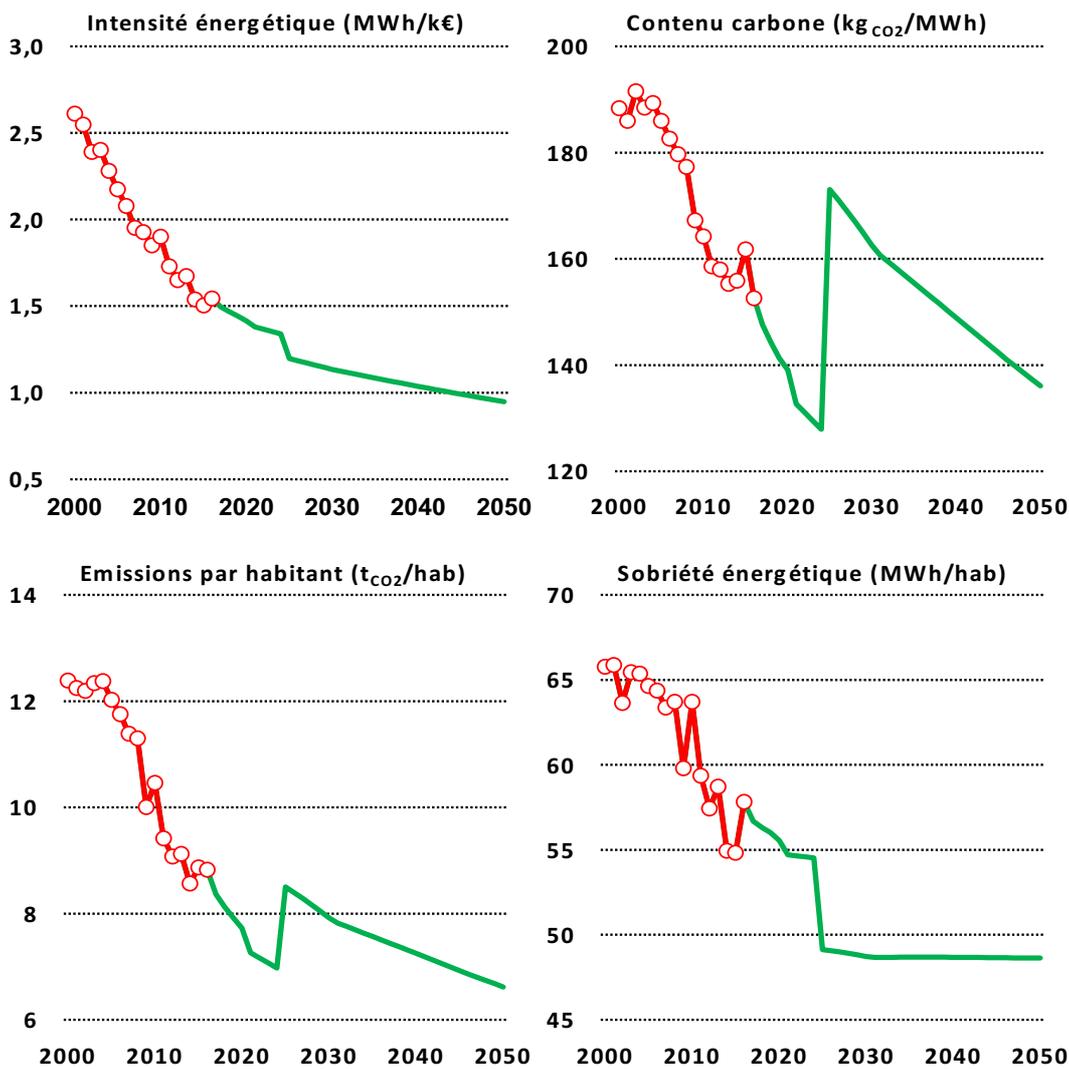
Les émissions de gaz à effet de serre ont été recalculées par nos soins en considérant les émissions élémentaires du charbon (340 kg<sub>CO2</sub>/MWh) du pétrole (260 kg<sub>CO2</sub>/MWh) et du gaz (204 kg<sub>CO2</sub>/MWh). Les parts fossiles utilisées dans la pétrochimie ont été retranchées car non brûlées (et donc non émettrices).

Les calculs conduisent en 2016 à des émissions globales de 103 Mt<sub>CO2</sub> parfaitement en ligne avec les chiffres de Global Carbonatlas<sup>44</sup> qui les estiment à 100 Mt<sub>CO2</sub>. Nous n'avons pas dans ce rapport différencié les émissions des véhicules diesel, essence et GPL.

<sup>44</sup> <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>

**INDICATEURS ENERGETIQUES**

Les indicateurs énergétiques du scénario Marmotte sont présentés dans la Figure 55.



**Figure 55 – Indicateurs énergétiques**  
**Rouge : données historiques – Vert : Scénario Marmotte**

L'intensité énergétique continue de décroître mais à un rythme inférieur à celui observé historiquement depuis le début des années 2000. Ce résultat n'est pas étonnant et est dû à la fois au manque de pugnacité en termes d'efficacité énergétique dans les transports, l'habitat et

l'industrie mais aussi à la faible croissance économique (1,2% à partir de 2021) bien inférieure aux 2% réalisés depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. L'intensité énergétique 2050 est égale à 0,95 kWh/€ une valeur encore bien supérieure à la valeur asymptotique cible de 0,7 kWh/€. L'intensité énergétique bénéficie toutefois de l'efficacité des centrales à gaz CC faisant suite à la sortie du nucléaire en 2025.

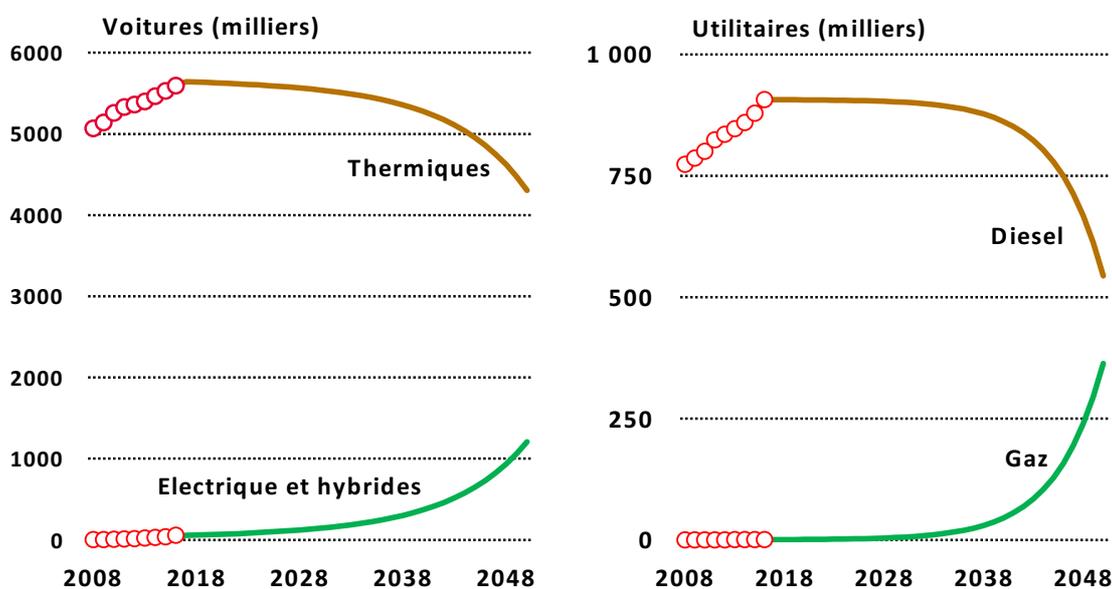
La réduction du contenu carbone et des émissions par habitant sont stoppées nettes par la sortie du nucléaire. Le contenu carbone en 2050 est de l'ordre de 136 kg<sub>CO2</sub>/MWh contre 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh en 2016 soit une réduction de seulement 10%. Les émissions par habitant se contractent quant à elles significativement. Elles passent entre 2016 et 2050 de 8,8 t<sub>CO2</sub> à 6,6 t<sub>CO2</sub>.

Enfin, **Marmotte** permet au Belge, toujours grâce à l'introduction de cycles combinés dans la génération électrique, d'améliorer sensiblement sa sobriété énergétique qui passe de 58 MWh/hab en 2016 à 49 MWh/hab en 2050.

**SCENARIO 2 : « TORTUE »**

**TRANSPORTS**

Si **Tortue** ne considère pas de réduction supplémentaire de kilométrage par rapport à **Marmotte**, le parc de véhicules (voitures individuelles et utilitaires) n'augmente plus et reste égal aux valeurs 2016 sur l'ensemble de la période 2016 à 2050. Le déficit de passagers\*km est en partie reporté sur le rail (il augmente de 18% par rapport à **Marmotte**) mais surtout par un encouragement au covoiturage avec un nombre de passagers par voiture passant de 1,56 à 2. Pour le fret, le déficit de tonnes\*km est entièrement compensée par le transport ferroviaire (transport proprement dit + ferroutage). Entre 2016 et 2050, **Tortue** fait ainsi passer la consommation d'énergie dans le rail de 1,6 TWh à 10 TWh.



**Figure 56 – Déplacement des voitures individuelles thermiques vers les véhicules hybrides et électriques. Déplacement des utilitaires diesel vers le gaz naturel.  
Rouge : données historiques – Vert/brun : scénario *Tortue***

**Tortue** introduit dans le parc 25% de voitures électriques et hybrides ainsi que 40% d'utilitaires au gaz à l'horizon 2050. Le parc de voitures thermiques amorce une décroissance durant la décennie 2020 qui s'accélère en suite grâce à la croissance du parc électrique et hybride (**Figure 56-gauche**). En 2050, le parc de voitures individuelles contient 4,3 millions de voitures thermiques et 1,1 millions de voitures hybrides et électriques.

Le scénario est assez voisin pour les utilitaires (**Figure 56– droite**). Le nombre de véhicules diesel reste quasi stable jusqu’au milieu des années 2030 puis amorce une forte décroissance grâce à la montée en puissance des véhicules au gaz. En 2050, le parc d’utilitaires contient 550 000 véhicules au diesel et 360000 véhicules au gaz.



L’énergie grise désigne l’énergie primaire consommée au cours de l’ensemble du cycle de vie d’un matériau/produit et non pas seulement durant sa phase utilisation : production, extraction, transformation, fabrication, transport, mise en œuvre, entretien et recyclage. Considérer l’énergie grise est important pour l’ensemble des secteurs.

Ainsi, dans l’habitat, certains matériaux d’isolation à base de chanvre peuvent nécessiter une quantité énergie jusqu’à vingt fois inférieure à celle requise pour des isolants à base de polyuréthane. De même, si une voiture électrique est réputée verte durant son utilisation, la production d’une batterie s’avère fortement émettrice de CO<sub>2</sub> (voir encadré de la page 74).

Considérer l’énergie grise et son impact rappelle aussi que la question énergétique ne s’arrête pas aux frontières d’un pays.

Grâce à une R&D beaucoup plus poussée chez les constructeurs automobiles qui continuent de croire à la voiture thermique basse consommation sur les grandes distances (réduction du poids, réduction des frottements au niveau de la carrosserie et des pneumatiques, introduction de la boîte digitale – voir **Annexe 6**) la consommation des voitures thermiques est réduite à 4 l/100 km (**Figure 57**). Par contre **Tortue** maintient la vitesse sur autoroute à 120 km/h.

**Tortue** n’introduit que marginalement l’hydrogène (pile à combustible) dans les transports. En 2050 seulement 11 000 véhicules roulent à l’hydrogène. De même, et dans la mesure où le gaz a été largement introduit dans les utilitaires où il représente 40% du parc à l’horizon 2050, la voiture au gaz n’est que très faiblement introduite dans le mix transport (17 000 voitures fonctionnant au gaz naturel en 2050). Enfin, compte tenu de son autoconsommation (elle peut atteindre 90% pour les biocarburants de première génération) et des potentiels conflits avec la chaîne alimentaire, **Tortue** n’encourage pas la croissance des biocarburants. Leur consommation dans les transports reste constante sur la période 2017 à 2050.

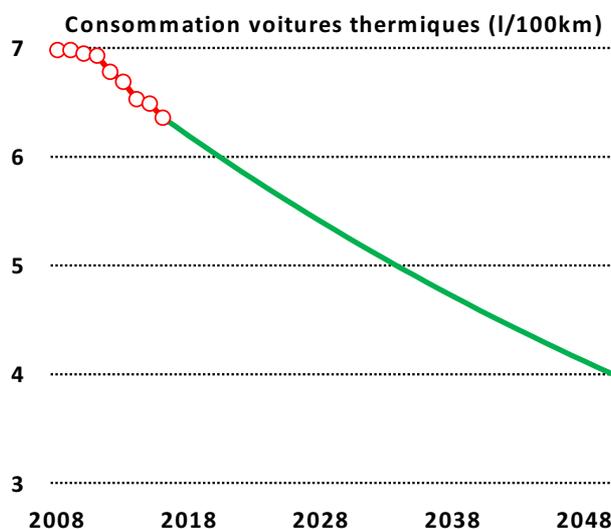
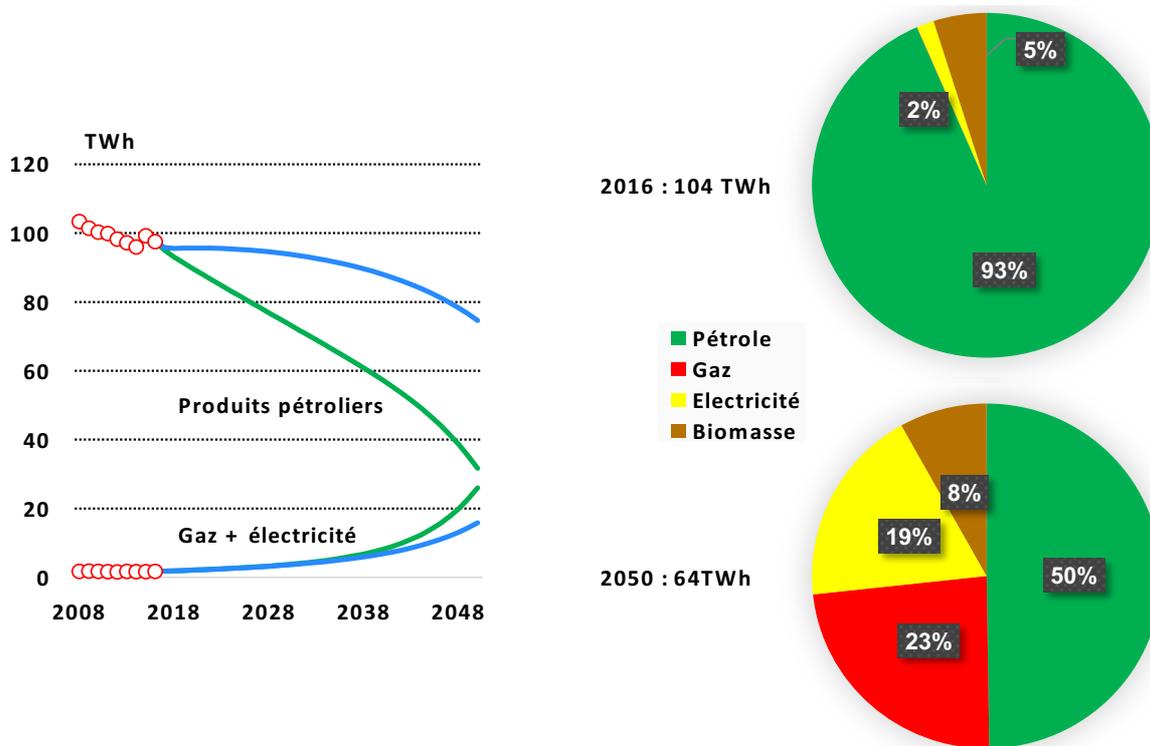


Figure 57 – Evolution de la consommation des voitures thermiques<sup>45</sup>  
Rouge : données historiques – Vert : scénario *Tortue*

La **Figure 58** compare les consommations par carburant dans les transports pour les scénarios **Marmotte** et **Tortue**. Alors que **Marmotte** réduisait de seulement 25% la part des produits pétroliers dans les transports, **Tortue** permet d'atteindre 70% de réduction. En valeur absolue, la part du pétrole passe de 98 TWh en 2016 à 32 TWh en 2050. Cette réduction s'explique en partie par la stabilisation du nombre de véhicules, par la réduction de la consommation des voitures thermiques à 4l/100km mais aussi par la croissance significative de la part du gaz (utilitaires) et de l'électricité (voitures électriques). Le mix transport du scénario **Tortue** est ainsi composé en 2050 de 50% de produits pétroliers, de 23% de gaz, de 19% d'électricité et de 8% de biocarburants (**Figure 58**). **Tortue** montre que la consommation d'électricité des 1,1 millions de véhicules électriques est globalement faible (1,75 TWh). Elle représente seulement 1,5% de la consommation nette d'électricité.

<sup>45</sup> <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/>



**Figure 58 – Comparaison de *Marmotte* (bleu) et *Tortue* (vert) dans les transports  
Comparaison mix transports en 2016 et 2050**

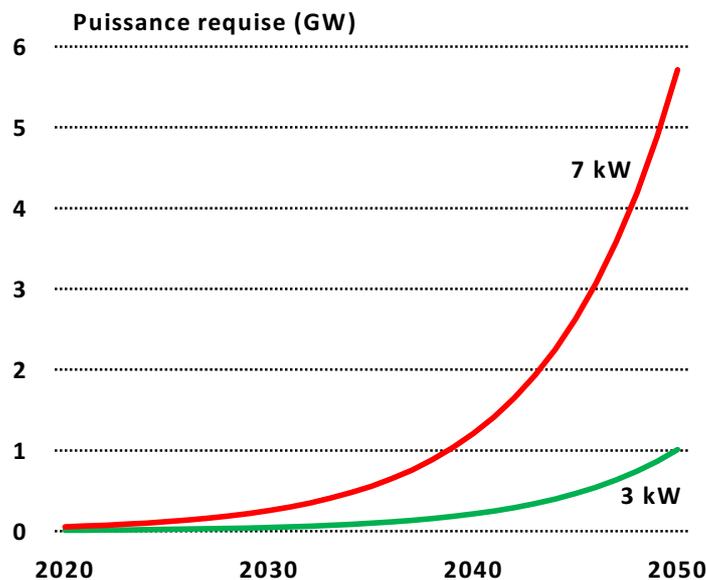


La voiture électrique est présentée comme une solution idéale car non émettrice de CO<sub>2</sub>. En réalité, le bilan n'est favorable que si l'électricité utilisée est décarbonée (nucléaire et/ou renouvelables) et non à partir de gaz ou de charbon. Mais l'analyse ne s'arrête pas là. La fabrication des batteries de véhicules électriques est très émettrice de CO<sub>2</sub>. Selon un rapport récent de la *Swedish Energy Agency*<sup>46</sup>, la fabrication d'un kWh de batterie émettrait en moyenne 200 kg<sub>CO2</sub>. Ainsi, en supposant une électricité complètement décarbonée, une batterie de 85 kWh ne deviendra neutre en carbone par rapport à une voiture diesel (130 g<sub>CO2</sub>/100 km) qu'au bout de 130 000 km.

<https://www.ivl.se/english/startpage/top-menu/pressroom/press-releases/press-releases---arkiv/2017-06-21-new-report-highlights-climate-footprint-of-electric-car-battery-production.html>



Le Belge a parcouru en 2016 15 000 km soit une moyenne quotidienne de 57 km/jour sur 260 jours/an. Cela correspond à environ 8 kWh d'électricité, le tiers de l'autonomie d'une batterie 25kWh. Le Belge devrait donc en théorie recharger sa voiture un jour sur trois. Sur les 1,1 millions de voitures électriques de *Tortue*, 330 000 véhicules électriques rechargeraient donc simultanément. Sur des prises de 3 kW (230 V & 13 A) cela correspond à un appel de 1 GW, une puissance tout à fait acceptable dans la mesure où, grâce au digital, chaque voiture sera équipée d'un logiciel permettant de charger la voiture entre 22h00 et 07h00 (**Figure 59** Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.). Afin d'éviter des recharges systématiques et inutiles aux heures de pointe, cette pratique sera encouragée grâce à une tarification dissuasive. Toutefois, en matière de recharge, il importe de distinguer la charge lente de nuit et la charge rapide de jour sur des bornes de hautes puissance (comprises entre 20 kW et 120 kW) capables de fournir dans un temps très court l'énergie nécessaire pour des longs trajets. Des prises qui en aucun cas ne seront installées au domicile des particuliers. Cette pratique ne pouvant s'appliquer qu'à une partie marginale du parc, la voiture électrique sera dans l'avenir avant tout une urbaine et non une routière.



**Figure 59 – Puissance correspondant à la charge simultanée du parc électriques 2050 sur des bornes de 3 kW et 7 kW - Scénario *Tortue*.**

## HABITAT

Si le rythme des constructions neuves (nombre de logements de catégorie A) et la surface des logements (82 m<sup>2</sup>) restent inchangés par rapport à **Marmotte**, **Tortue** améliore considérablement l'efficacité énergétique de l'habitat grâce à un projet ambitieux de rénovation. Le plan est « *glissant* » : il modernise en priorité les logements les plus énergivores (E/F/G) (**Figure 60**).

Ainsi, les 50% de logements E, F et G sont isolés aux normes D et C (d'où un pic vers le milieu des années 2030) puis progressivement à la norme B. Vers 2045, tous les logements E, F & G auront disparu du parc.

En 2050, la distribution de l'habitat belge est la suivante : 23% de logements neufs en A, 40% en B, 22% en C et 15% en D. Entre 2016 et 2030, 3,5 millions de logements auront été rénovés soit un rythme de l'ordre de cent mille par an.

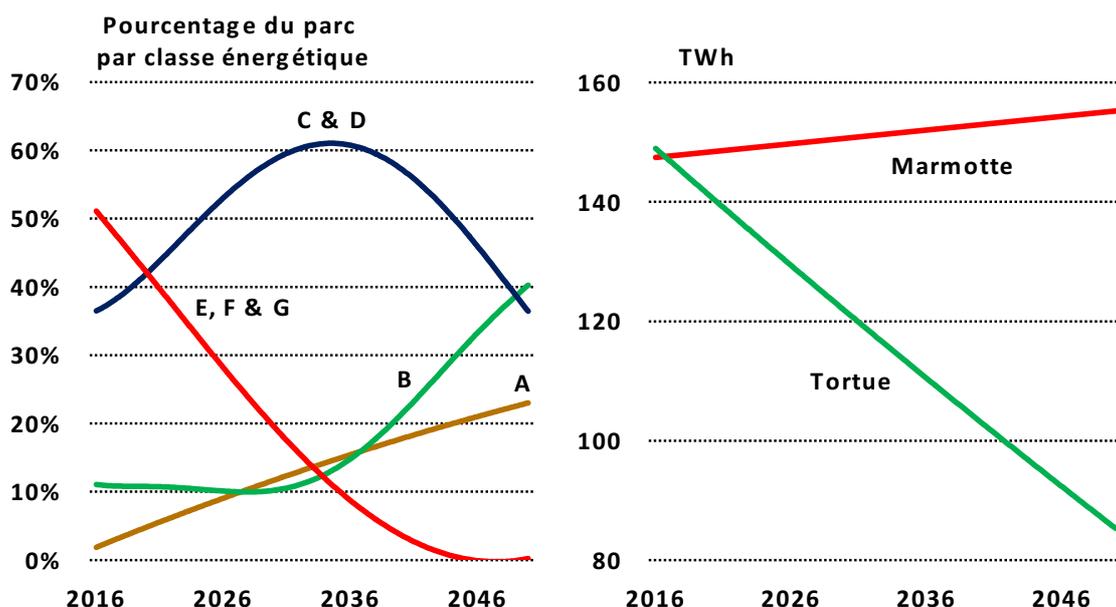
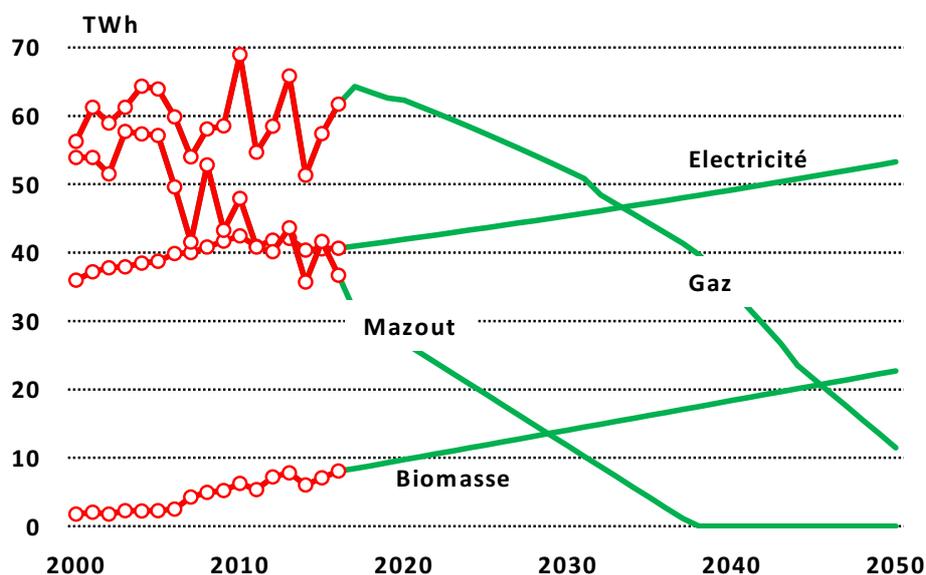


Figure 60 – Rénovation du parc de logements (scénario Tortue)

Grâce à ce projet de rénovation, **Tortue** permet de réduire de presque moitié la quantité d'énergie consommée dans l'habitat belge qui passe de 148 TWh en 2016 à 87 TWh en 2050. **Tortue** accélère également la sortie du mazout programmée en 2038 (contre 2045 dans **Marmotte**).

Grâce au plan de rénovation, la part du gaz dans l'habitat est divisée par 6 (**Figure 61**). En 2050, le mix habitat contient 13% de gaz, 26% de biomasse et 61% d'électricité.



**Figure 61 – Evolution du mix énergétique habitat**  
Rouge : données historiques – Vert : Scénario Tortue



Le verre est un matériau essentiel dans la conception du bâtiment. Le grand public connaît bien les propriétés isolantes des châssis à double ou triple vitrage. Ce qui est moins connu, ce sont les vertus des « *nano-coatings* » d'oxydes métalliques non visibles qui confèrent au verre un certain nombre de fonctionnalités nouvelles. En particulier ils permettent d'augmenter l'efficacité énergétique en réduisant les besoins en chauffage, en conditionnement d'air et même en éclairage.

Comme **Marmotte**, **Tortue** considère que la part de chaleur représente environ 70% de la consommation énergétique totale dans l'habitat. L'électricité spécifique est maintenue constante à sa valeur 2016 (40 TWh) considérant que les gains d'efficacité énergétique (remplacement des ampoules incandescentes et halogènes par des LEDs, effet de la domotique dans les logements B&C) compensent l'augmentation de la demande en électricité domestique (électroménager, informatique, cuisson à l'électricité). La réduction de la consommation d'énergie dans l'habitat repose donc intégralement sur des gains de chaleur liés à l'isolation.

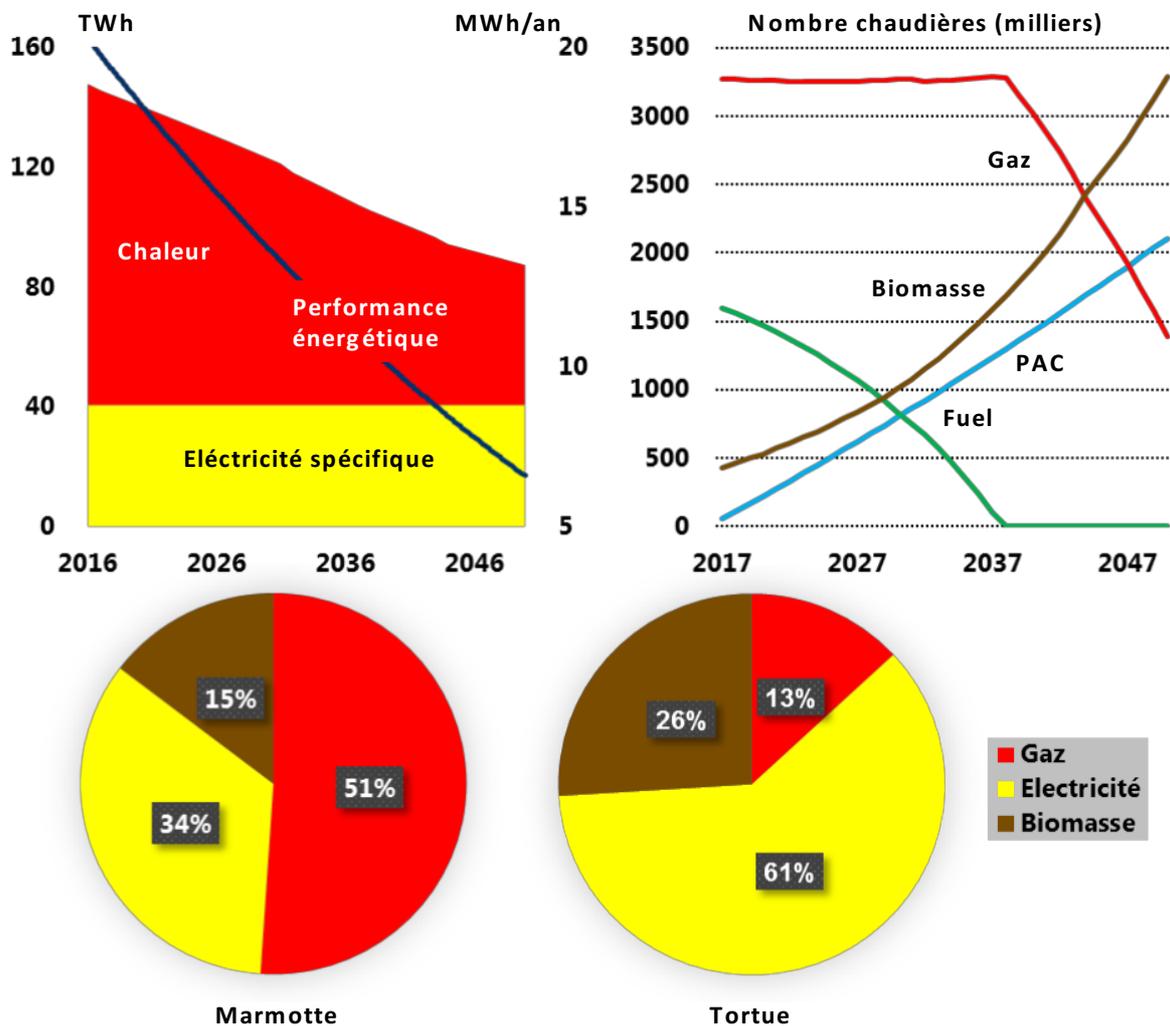


Figure 62 – Evolution des installations de chauffage – Scénario Tortue  
 Comparaison des mix habitat 2050 entre Tortue (gauche) et Marmotte (droite)

La part de la chaleur dans un logement est ainsi divisée par trois. Elle passe de 20 MWh/an en 2016 à 7 MWh/an en 2050 (**Figure 62**). Une grande partie de cette consommation de chaleur est déplacée vers les technologies « *bas carbone* ». Les nouvelles constructions (c'était déjà le cas dans **Marmotte**) mais aussi certains bâtiments récents classés en B & C sont systématiquement équipés de pompes à chaleur (PACs) aérothermiques consommant en moyenne 6 MWh/an<sup>47</sup>. En 2050, 2,1 millions de logements sont ainsi chauffés avec des PACs. La puissance d'une PAC étant de l'ordre de 5 kW, le pic de puissance en plein hiver peut atteindre 10 GW. Associé à la croissance du parc de voitures électriques, **la puissance installée peut donc très vite devenir un facteur bloquant.**

<sup>47</sup> <https://selectra.info/energie/guides/conso/pompe-a-chaleur>

La sortie du fuel en 2038, la croissance de la biomasse et des PACs couplées à une réduction significative de la consommation conduisent à une génération de chaleur dans l'habitat composée en 2050 de 31% de PAC, 20% de chaudières au gaz et 49% de chaudière à partir de biomasse. Bien qu'en quantité absolue identique à **Marmotte**, la biomasse bénéficie de la réduction de consommation et devient la source principale de chaleur dans l'habitat. Quant au mix global, il ne contient plus que 13% de gaz contre 61% d'électricité et 26% de biomasse (**Figure 62**). Le projet habitat réduisant préférentiellement la chaleur renforce mécaniquement les applications électriques ménagères, qui en 2050 représentent 46% de la dépense énergétique.

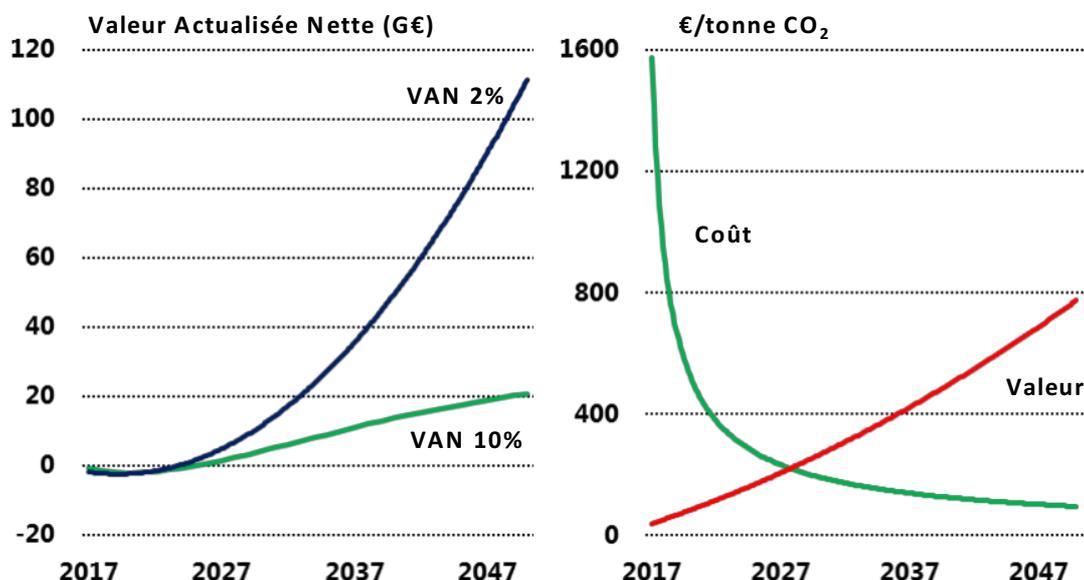


La « valeur de l'action pour le climat »<sup>48</sup> est une référence d'évolution du prix du carbone. Cette valeur permet d'évaluer et de sélectionner les actions utiles pour atteindre la neutralité carbone inscrite dans l'Accord de Paris de 2015. Ainsi par exemple en considérant que la valeur du CO<sub>2</sub> atteindra en 2030 250 €, toute action permettant de réduire les émissions et dont le coût rapporté à la tonne non émise est inférieur à 250 €/t<sub>CO2</sub> deviendra économique.

Le coût du projet rénovation a été calculé en considérant que les travaux d'isolation d'un logement EFG pour le transformer en un logement de type D (isolation basique des murs, fenêtres et combles) coûtent 100€/m<sup>2</sup>, en logement C (doubles vitrages, isolation des sols) 100€ supplémentaires et en logement B (domotique basique) à nouveau 100€ supplémentaires. Les isolations se cumulant, la transformation d'un logement E/F/G en logement B coûte ainsi 300€/m<sup>2</sup>.

A l'isolation thermique a été rajouté le coût des pompes à chaleur (hors celles installées systématiquement dans les nouveaux logements) à un prix moyen de 10 000 € par PAC.

<sup>48</sup> <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/dp-valeur-action-pour-climat-fevrier-2019.pdf>



**Figure 63 – Projet de rénovation de l’habitat du scénario *Tortue*  
VAN 2% et valeur du projet par rapport au coût**

Le coût cumulé du projet est de 41 milliards d’euros (soit un investissement moyen de 1,2 milliards d’euros /an<sup>49</sup>) pour une économie énergétique cumulée de 217 milliards d’euros. Les Valeurs Actualisées Nettes (VAN 2% & 10%) des projets en 2050 sont respectivement égales à 110 milliards d’euros et 21 milliards d’euros. Le temps de retour sur investissement (VAN>0) est de l’ordre de 8 ans (**Figure 63**). Dans ce calcul économique, le prix du kWh (toutes énergies confondues – 0,15 € en 2016) a été inflaté de 1% par an jusqu’en 2050. Il s’agit là d’un accroissement très prudent. Un accroissement de 4% par an conduirait à un prix du kWh de 0,55€ en 2050. La VAN2% 2050 doublerait alors pour atteindre 241 G€.

En termes d’emplois, considérant une moitié dédiée aux investissements et une moitié à la main d’œuvre, le plan de rénovation correspond à environ<sup>50</sup> 10 000 emplois pérennes dans le bâtiment sur base d’un coût total employeur de 60000 € par an et par emploi.

Par rapport à *Marmotte*, *Tortue* permet d’économiser 260 millions de tonnes cumulées de CO<sub>2</sub>. Le coût de la tonne de carbone non émise décroît très rapidement et passe au-dessous de la « valeur dans l’action pour le climat » en 2028. En 2050, la tonne de carbone non émise coûte moins de 100 € alors que sa valeur dans l’action pour le climat vaut 775 €.

Ceci confirme donc tout l’intérêt de la rénovation de l’habitat belge qui, en termes économiques et environnementaux, apparaît de loin comme le projet le plus pertinent. En considérant une moitié du projet en équipement et la moitié du projet en main d’œuvre, le projet habitat peut

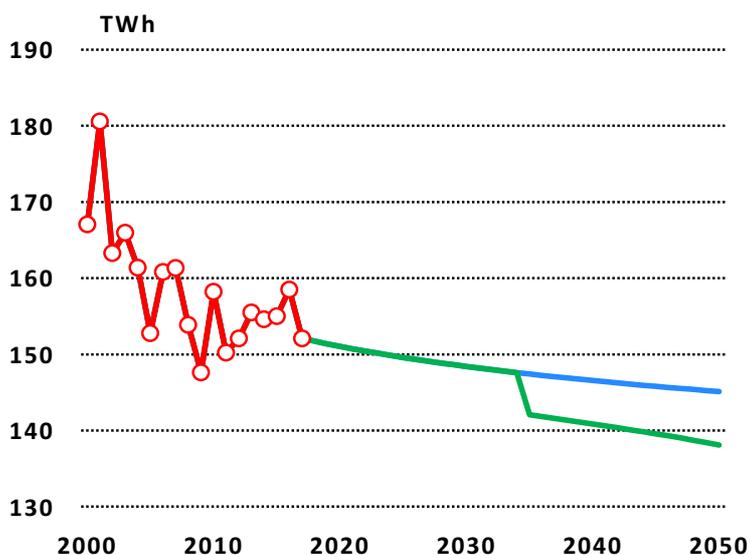
<sup>49</sup> Selon le ministère français de l’Ecologie, La rénovation thermique d’un million de logements coûte environ 10 milliards d’euros soit 10000 € par logement. Le plan de rénovation FABI rénove environ cent mille logements par an pour 1,2 milliards d’euros soit 12000 € par logement

<sup>50</sup> <https://paiecheck.com/2012/10/20/salaires-dans-la-construction-en-belgique/>

créer de l'ordre de 10 000 emplois pérennes dans le bâtiment pour la seule rénovation thermique.

## INDUSTRIE

Le mix industriel de **Tortue** est globalement similaire à celui de **Marmotte** ne disposant pas davantage de ruptures technologiques dans les procédés et les organisations pour faire évoluer le mix industriel autrement que de façon incrémentale.



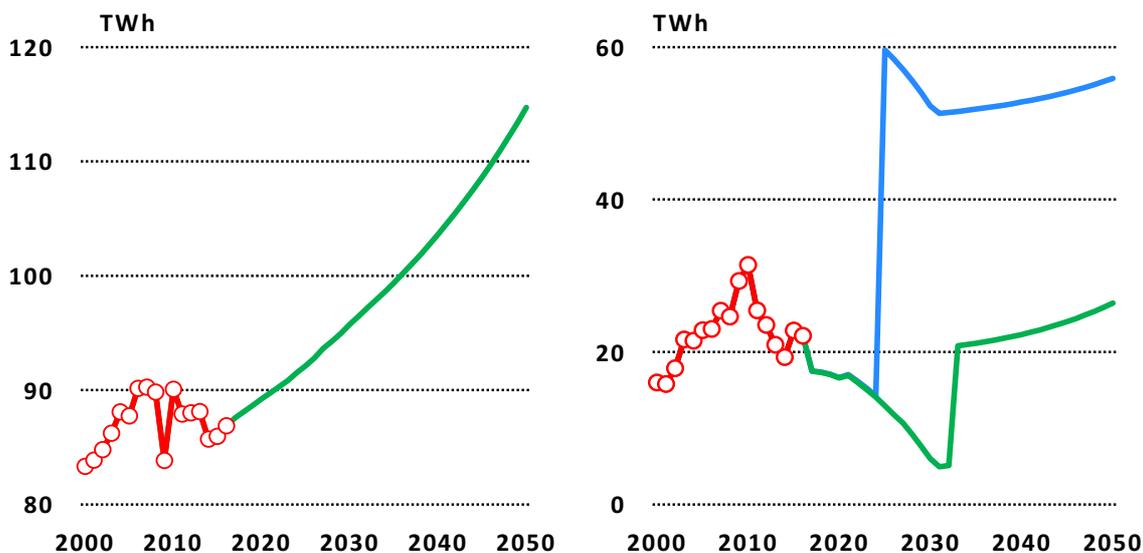
**Figure 64 – Effet de la cogénération sur la consommation d'énergie dans l'industrie**  
**Rouge : données historiques – Bleu : Marmotte – Vert - Tortue**

Toutefois, **Tortue** profite de l'opportunité des nouvelles centrales au gaz (voir paragraphe suivant) pour mettre en œuvre de la cogénération partagée répartie de façon homogène entre les cinq secteurs industriels (raffinage, sidérurgie, chimie, ciment et autres applications).

Cette cogénération (**Figure 64**) permet de récupérer 20% de l'énergie primaire injectée soit entre 5 TWh et 7 TWh par rapport au scénario **Marmotte**.

**GENERATION ELECTRIQUE**

Comme pour le scénario **Marmotte**, **Tortue** considère que la génération électrique belge sort du charbon et du pétrole en 2021. Par contre, **Tortue** ne considère pas une sortie unilatérale du nucléaire en 2025. Ce second scénario suppose que la Belgique ferme seulement trois réacteurs nucléaires (soient 2 GW) en 2033 mais prolonge les autres réacteurs (soient 4 GW) jusqu'en 2050. La production d'électricité nucléaire est donc réduite de seulement un tiers à partir de 2033. La mise en œuvre des ENRi et de la biomasse sont identiques à **Marmotte**.



**Figure 65 – Evolution de la demande d'électricité et de la part du gaz**  
**Rouge : données historiques – Bleu : Marmotte - Vert : Tortue**

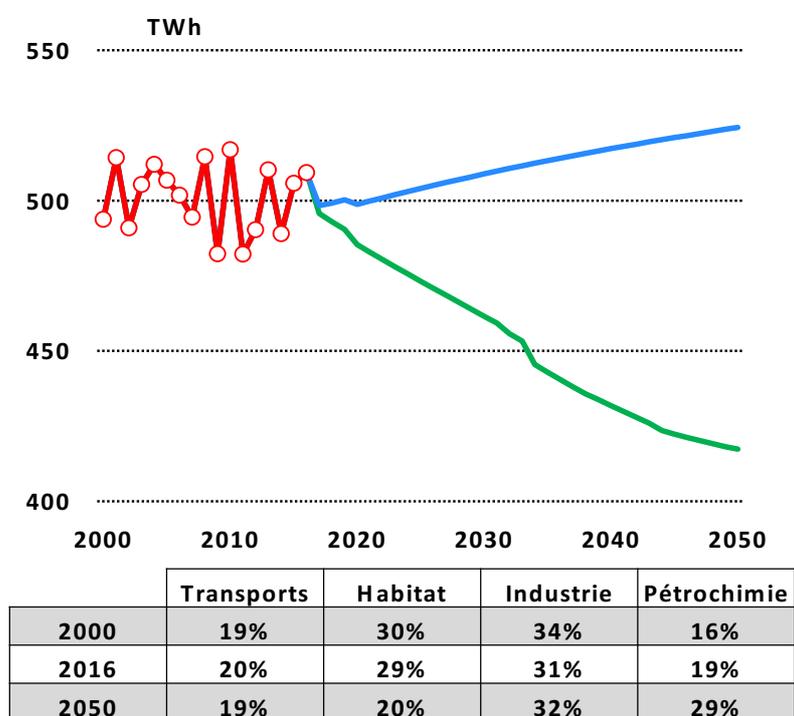
Comme dans **Marmotte**, c'est au profit des centrales à gaz que se fait la réduction du nucléaire. Ces nouvelles centrales à gaz sont des cycles combinés à cogénération<sup>51</sup> dont le rendement peut atteindre 80% (60% CC + 20% de cogénération - voir **Annexe 6**). Cette pratique est encouragée par l'Union Européenne depuis de nombreuses années<sup>52</sup>. La chaleur issue de la cogénération est entièrement dédiée à l'industrie (voir paragraphe précédent). La consommation d'électricité en 2050 atteint 115 TWh (**Figure 65**) une valeur à peine supérieure (+2TWh) à **Marmotte**. La part du gaz dans la génération électrique de **Tortue** est par contre bien inférieure à celle de **Marmotte**. La production électrique 2050 se compose de 27% de nucléaire, 25% de gaz, 20% d'éolien, 10% de solaire photovoltaïque et 17% de biomasse.

<sup>51</sup> COGEN Europe regroupe les acteurs industriels européens sur [www.cogeneurope.eu](http://www.cogeneurope.eu). Sa vision est endossée par de nombreuses organisations parmi lesquelles la CREG et COGEN Vlaanderen ([www.cogenvlaanderen.be](http://www.cogenvlaanderen.be))

<sup>52</sup> Directives européennes 2004/08/EC et 2012/27/EU

**USAGES FINAUX & ENERGIE PRIMAIRE**

Contrairement à *Marmotte*, la consommation d'énergie finale décroît significativement par rapport à sa valeur actuelle. Entre 2016 et 2050, elle passe de 510 TWh à 423 TWh soit un déclin de l'ordre de 17% (**Figure 66**). Au niveau des usages, la part de l'habitat passe de 30% à 20% tandis que la part des transports et de l'industrie restent quasiment similaires. La part gagnée par la pétrochimie doit être relativisée dans la mesure où il s'agit d'une application non énergétique des combustibles fossiles.



**Figure 66 – Evolution de l'énergie finale**  
 Rouge : Données historiques – Bleu : *Marmotte* – Vert : *Tortue*

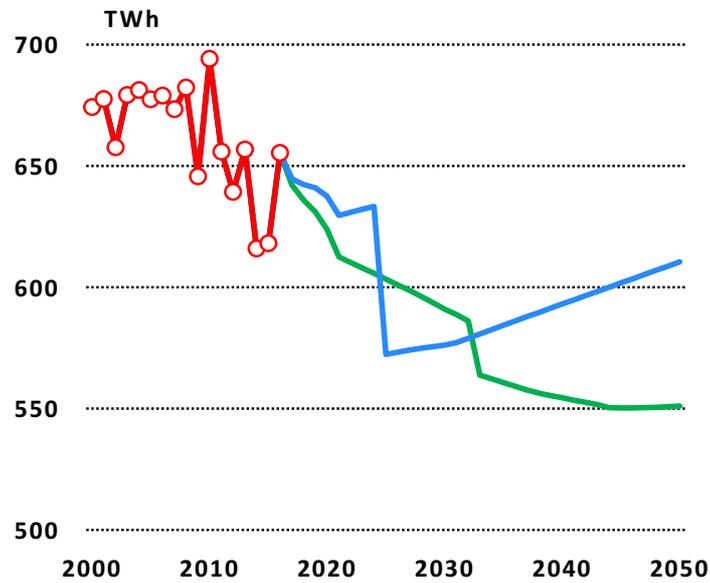


Figure 67 – Consommation d'énergie primaire  
Rouge : données historiques - Bleu : *Marmotte* Vert : *Tortue*

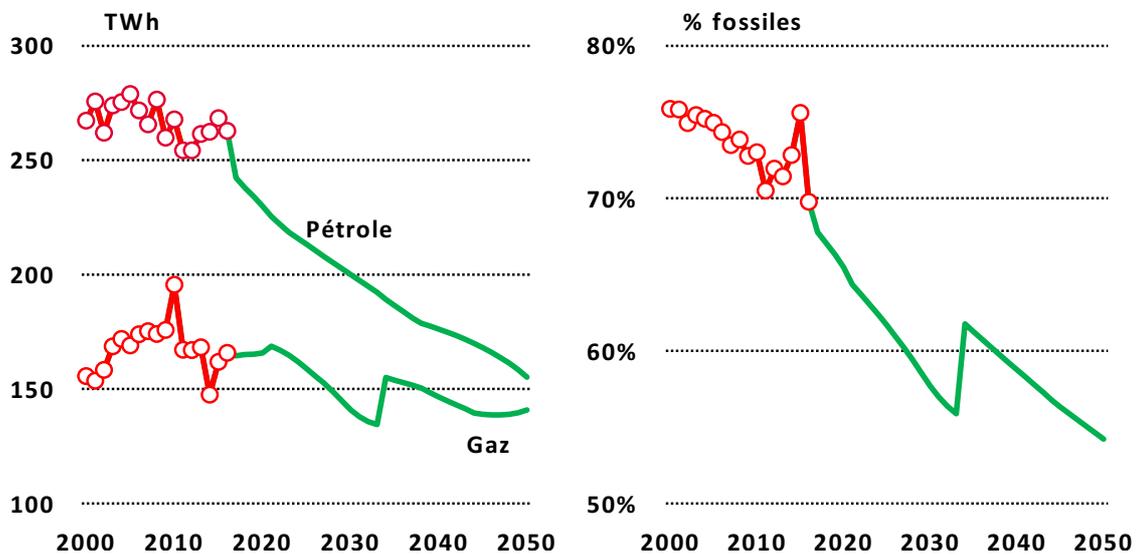


Figure 68 – Evolution de la consommation  
et du % de fossiles - Scénario *Tortue*

En ligne avec l'évolution de l'énergie finale, **Tortue** contracte l'énergie primaire qui baisse de 15% en passant de 655 TWh en 2016 à 551 TWh en 2050 (**Figure 67**).

La sortie partielle du nucléaire accroît la réduction d'énergie primaire dans la mesure où les réacteurs nucléaires sont remplacés par des CC gaz à cogénération. Possédant un rendement bien supérieur, ils sont moins gourmands en énergie primaire. Réduire le nucléaire et déplacer vers le gaz est donc paradoxal puisque cette mesure diminue la demande en énergie primaire tout en accroissant les émissions de CO<sub>2</sub>.

En absolu, la consommation de pétrole se réduit de 100 TWh passant de 263TWh en 2016 à 156 TWh en 2050. Par contre, après un déclin durant la période 2020 à 2035 liées notamment à la rénovation de l'habitat, la consommation de gaz remonte légèrement à la suite de la sortie partielle du nucléaire. Sa valeur se stabilise autour de 145 TWh (**Figure 68**) en fin de période.

En part du mix, **Tortue** réduit significativement la consommation d'énergie fossile par rapport à **Marmotte**. En 2050, le mix belge a fortement réduit sa part de fossiles qui passe de 75% pour **Marmotte** à 54% pour **Tortue**.

En supposant toujours les prix du gaz et du pétrole constant à respectivement 8 US\$/MBTU<sup>53</sup> et 60 US\$/bbl, la facture belge d'énergie fossile sur la période 2016 à 2050 est réduite de près de 100 milliards d'euros passant 447 milliards d'euros pour **Marmotte** à 350 milliards pour **Tortue**.

Le scénario **Tortue** débouche sur un mix énergétique primaire composé de 28% de pétrole, 26% de gaz, 17% de nucléaire, 7% de renouvelables et 21% de biomasse. Les énergies fossiles restent donc malgré tout largement prépondérantes.

---

## EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

Le scénario **Tortue** réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 64% en les faisant passer sur la période 1990 à 2050 de 121 millions de tonnes à 44 millions de tonnes (**Figure 69**). La sortie partielle du nucléaire (moins 2 GW) en 2034 engendre logiquement une augmentation des émissions.

Si le parc nucléaire avait été intégralement maintenu, ces émissions auraient été réduites de 7 Mt<sub>CO2</sub> supplémentaires (**Figure 69**). Globalement, un GW nucléaire supprimé engendre entre 2 et 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> supplémentaires.

---

<sup>53</sup> BTU signifie British Thermal Unit. 1 Million de BTU est environ égal à 0,293 MWh

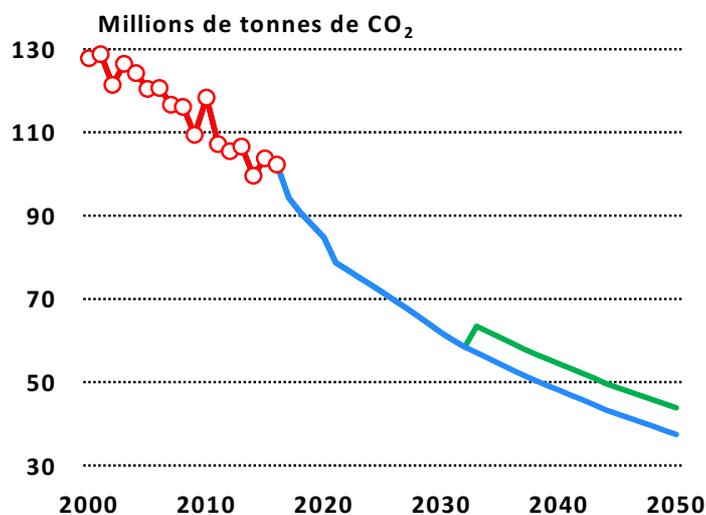


Figure 69 – Evolution des émissions de CO<sub>2</sub>  
 Rouge : données historiques – Vert : *Tortue* – Bleu : *Tortue* avec nucléaire

## INDICATEURS ENERGETIQUES

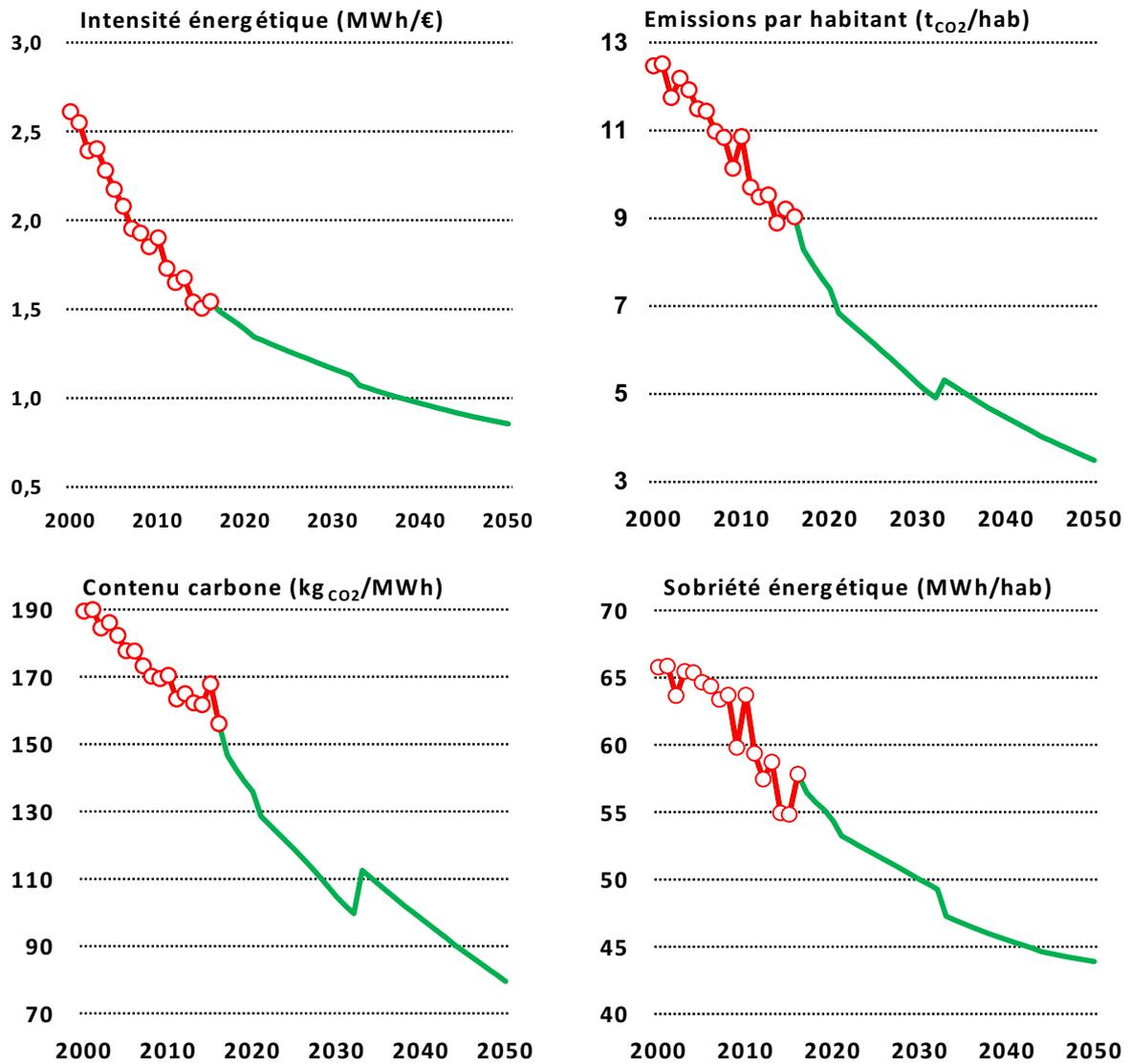
Les indicateurs énergétiques du scénario *Tortue* sont présentés sur la **Figure 70**.

*Tortue* continue de suivre la tendance observée depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. En 30 ans, l'intensité énergétique aura été divisée par presque deux, passant de 1,54 kWh/€ à 0,85 kWh/€ se rapprochant en 2050 par la même occasion de la valeur asymptotique de 0,70 kWh/€.

Le contenu carbone suit un trend similaire et passe de 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh à 80 kg<sub>CO2</sub>/MWh. Par rapport au début du siècle, l'énergie belge est donc grâce à *Tortue* presque deux fois moins carbonée avec toutefois, une augmentation du contenu carbone en 2035 suite à la sortie partielle du nucléaire.

Même conclusion en ce qui concerne les émissions par habitant. En trente ans, elles passent de 8,8 t<sub>CO2</sub>/hab à 3,5 t<sub>CO2</sub>/hab. La sortie partielle du nucléaire ralentit légèrement cette réduction.

Enfin, *Tortue* améliore sensiblement la sobriété énergétique du belge qui passe de 58 MWh/hab à 44 MWh/hab. Contrairement aux indicateurs « carbone », la sortie partielle du nucléaire améliore la sobriété énergétique. Ceci est bien entendu lié au gain spectaculaire de rendement suite au déplacement de la génération nucléaire vers des centrales à cycle combiné gaz/vapeur associé à de la cogénération



**Figure 70 – Indicateurs énergétiques**  
 Rouge : données historiques – Vert : Scénario *Marmotte*

### SCENARIO 3 : « LIEVRE »

#### TRANSPORTS

Par rapport à **Tortue**, le parc de voitures individuelles se réduit de 0,7% par an à partir de 2017. En 2050, le nombre de voitures individuelles a ainsi été réduit de 20% par rapport à 2016. En complément des déplacements vers le rail et du covoiturage considérés à la fois dans **Marmotte** et **Tortue**, **Lièvre** compense le déficit de km grâce au télétravail et/ou au coworking partiels. En termes de temps, la réduction de 20% du parc de voitures individuelles correspond environ à un jour par semaine de télétravail et/ou de coworking



Le télétravail est une organisation du travail où le travailleur exerce, grâce aux technologies de l'information et de la communication (internet, téléphonie mobile, visioconférence) une partie de son activité professionnelle à distance.

Le télétravail peut s'effectuer soit depuis le domicile soit dans un endroit proche de son domicile où sont concentrés des moyens techniques avancés comme la visioconférence, le haut débit de transmission ou de gros calculateurs. Cette méthode qui s'adresse aux travailleurs d'une même société ou de sociétés différentes s'appelle « *coworking* » ou « *télé-centre* ». Contrairement au télétravail, le *coworking* brise la solitude et encourage l'échange de bonnes pratiques. Il demande en compensation un déplacement limité.

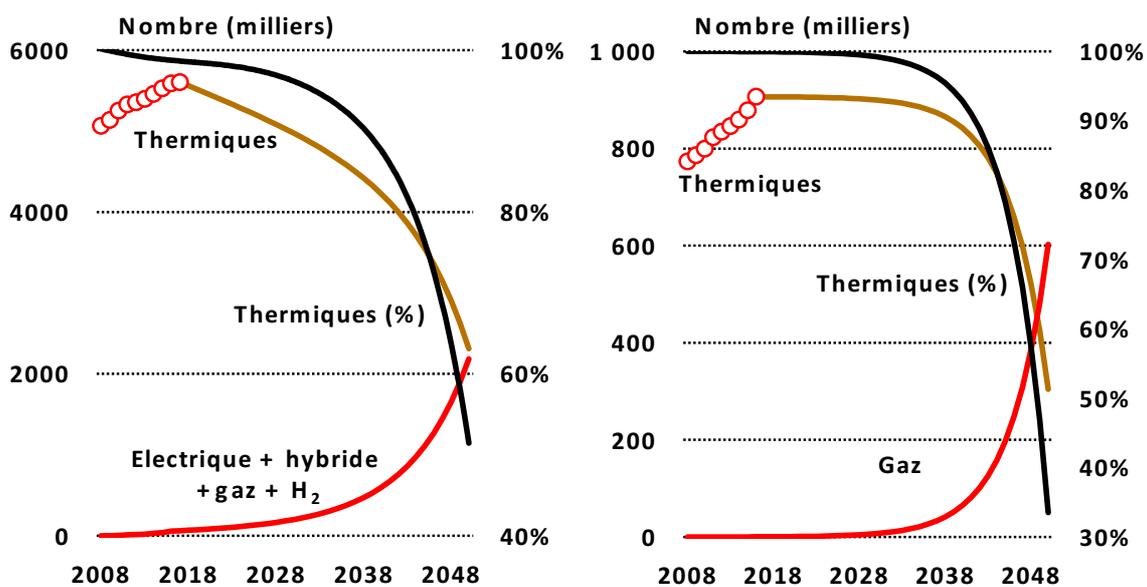
La convention collective de travail n° 85 signée le 9/11/2005 aménage les conditions de télétravail dans les deux cas.

Pour le fret, le nombre d'utilitaires reste constant et égal à sa valeur 2016 (hypothèse identique à **Tortue**). **Lièvre** n'augmente donc pas la part du rail par rapport à **Tortue**.

En ce qui concerne les voitures électriques et hybrides (**Figure 71 – gauche**), la croissance absolue est identique à celle de **Tortue**. Néanmoins, compte tenu de la stabilité globale imposée au nombre de voitures, la part des véhicules électriques et hybrides s'accroît mécaniquement de 25% à 35%. **Lièvre** n'encourage pas plus que **Marmotte** et **Tortue** les biocarburants dont la part absolue est maintenue à 5 TWh/an (valeur 2016).

**Lièvre** introduit par contre une part non négligeable (5% du parc à l'horizon 2050) de véhicules au gaz naturel (150 000 véhicules soit 3% du parc) et à l'hydrogène (un peu plus de 100 000 véhicules).

Ces derniers consomment moins de 0,5 TWh d'hydrogène<sup>54</sup>. Ceci sous-entend la mise œuvre de réseaux de distribution de gaz naturel et d'hydrogène suffisamment maillés sur l'ensemble du territoire mais aussi une production soutenue d'hydrogène décarboné par électrolyse de l'eau (« *power to gas* »). En supposant un rendement de 60%, la production de cet hydrogène nécessite 0,75 TWh d'électricité<sup>55</sup>. Provenant d'excédents d'énergies renouvelables intermittentes non consommés, ils ne sont pas comptabilisés dans les bilans énergétiques finaux.



**Figure 71 – Evolution du parc de voitures (gauche) et d'utilitaires (droite)  
Scénario Lièvre**

En 2050, le parc automobile est ainsi constitué de 50% de véhicules thermiques (essence, diesel et biocarburants confondus), de 45% de véhicules électriques et hybrides et de 5% de véhicules fonctionnant au gaz et à l'hydrogène (**Figure 71 – gauche**). Notons que la quantité relativement faible de véhicules individuels au gaz est un choix qui se justifie par le fait que le gaz a déjà été massivement introduit dans les utilitaires et dans la génération électrique suite à la sortie du nucléaire. Ceci imposera à la Belgique d'augmenter sensiblement ses importations de gaz. Pour cette raison, le gaz a été privilégié pour les utilitaires et l'électricité pour les voitures individuelles.

<sup>54</sup> Nous avons supposé une consommation de 1kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/100 km. Pour information le coût de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau se situe entre 4 et 6€/kg – « *Hydrogène : la transition énergétique en marche* » Pétrole & gaz. Energies nouvelles. Janvier/Février 2019.

<sup>55</sup> Il faut grosso modo 1 litre d'eau et 5 kWh d'électricité pour fabriquer 1 m<sup>3</sup> d'hydrogène en conditions normales par électrolyse de l'eau. Un kg d'hydrogène contient 33 kWh d'énergie. Il faut donc 55 kWh d'électricité pour fabriquer 1 kg d'hydrogène (la masse volumique de l'hydrogène est égale à 90g/m<sup>3</sup>). Le rendement est compris entre 60% et 70% suivant la technologie utilisée.



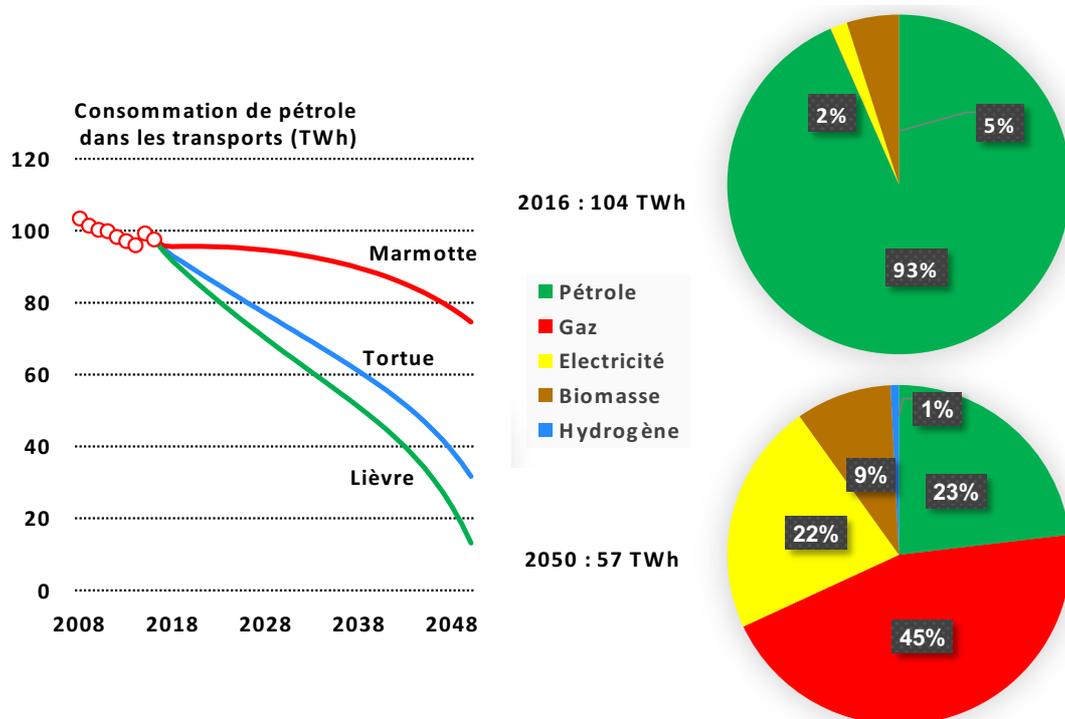
Le véhicule à hydrogène utilise une pile à combustible qui transforme l'hydrogène en courant électrique. La motorisation d'un véhicule hydrogène est donc électrique. Seule l'électrolyse de l'eau à partir de sources d'électricité décarbonées peut prétendre produire de l'hydrogène « vert ». Toutefois, la demande de production électrique est deux à quatre fois supérieure à celle d'un véhicule électrique équivalent. En cause le rendement de la production de l'hydrogène qui se situe entre 30% (réaliste) et 60% (très optimiste<sup>56</sup>). Le principal avantage du véhicule l'hydrogène par rapport au véhicule électrique est d'éliminer les inconvénients majeurs du temps de charge et de l'autonomie.

L'effet est encore plus marqué pour les utilitaires. Le maintien du parc à sa valeur 2016 conjugué à la croissance du gaz (pourtant en absolu identique à **Tortue**) fait chuter le nombre d'utilitaires diesel à 311 000 en 2050 soit un peu plus de 30% du parc global.

Enfin, **Lièvre** suppose qu'en 2030, la vitesse sur autoroute est ramenée de 120km/h à 100 km/h. Cette réduction permet d'atteindre un plancher de consommation de 3l/100km à l'horizon 2050 (contre 4l/100 km pour **Tortue** et 5l/100km pour **Marmotte**). Aucune réduction de consommation n'a par contre été considérée pour les utilitaires.

---

<sup>56</sup> Ce chiffre optimiste suppose que l'électrolyseur et la station de ravitaillement se trouvent au pied de l'éolienne.



**Figure 72 – Evolution de la consommation de pétrole dans les transports pour les trois scénarii. Evolution du mix transport (Scénario Lièvre)**

**Lièvre** permet de décroître de façon spectaculaire la consommation de produits pétroliers dans les transports (**Figure 72**) qui passe de 75 TWh pour **Marmotte** (contre 98 TWh aujourd’hui) à 32 TWh pour **Tortue** et 13 TWh pour **Lièvre** soit presque six fois moins. Entre 2016 et 2050, la consommation d’énergie finale dans les transports est réduite de moitié passant de 104 TWh à 57 TWh. Alors qu’en 2016, le pétrole y régnait en maître absolu, représentant 93% de la consommation, en 2050, sa part est tombée à 23%. Le gaz (massivement introduit dans les utilitaires) représente 45% de la consommation d’énergie dans les transports, l’électricité 22%, la biomasse 9% et l’hydrogène 1%.

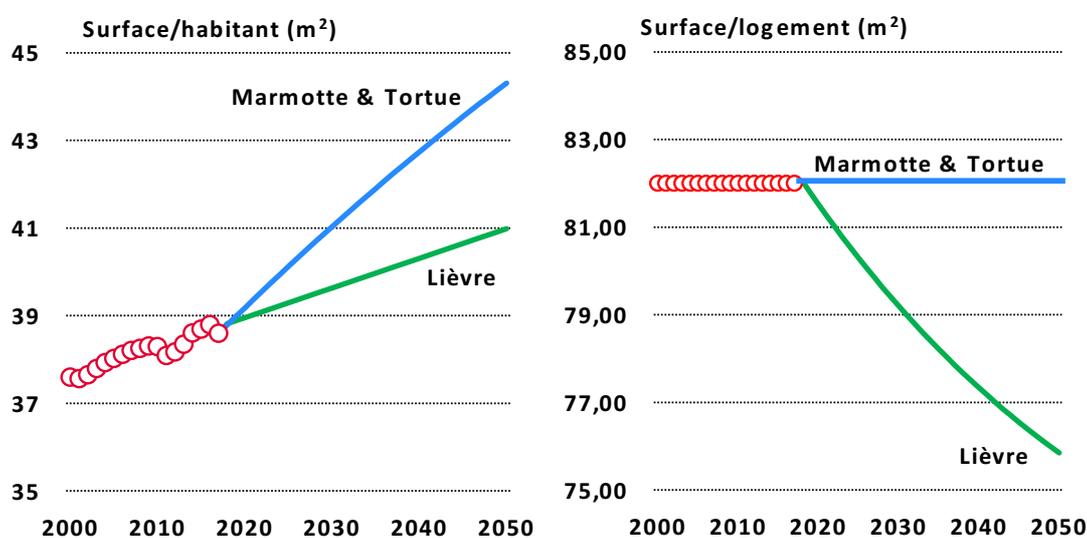


L’amélioration de l’efficacité d’un système s’accompagne souvent d’une augmentation de consommation. Le gain effectué se déplace vers une autre dépense augmentant in-fine la consommation totale. On parle d’« effet rebond » ou de « paradoxe de Jevons »<sup>57</sup>. Ainsi, l’amélioration des performances énergétiques dans les transports et l’habitat n’entraîne pas nécessairement une réduction globale de la consommation de la ressource : « ma voiture consomme moins donc pour le même prix je peux rouler davantage ». Aussi, l’amélioration de l’efficacité énergétique doit s’accompagner d’une prise de conscience de la population ainsi que de mesures législatives et/ou fiscales compensatoires.

<sup>57</sup> <https://mrmondialisation.org/le-paradoxe-de-jevons-ou-pourquoi-il-nexiste-pas-de-croissance-verte/>

**HABITAT**

**Marmotte** et **Tortue** avaient considéré que le parc immobilier poursuivait au cours des 30 prochaines années la croissance qu’il avait connue depuis le début du siècle et ce tout en maintenant une surface habitable moyenne par logement de 82 m<sup>2</sup>. Compte tenu de la faible croissance démographique, cette hypothèse conduisait à augmenter mécaniquement la surface par habitant de 15% (elle passait de 38,8 m<sup>2</sup> à 44,3 m<sup>2</sup>), un rythme de progression nettement supérieur à celui observé durant les quinze dernières années (**Figure 73**).

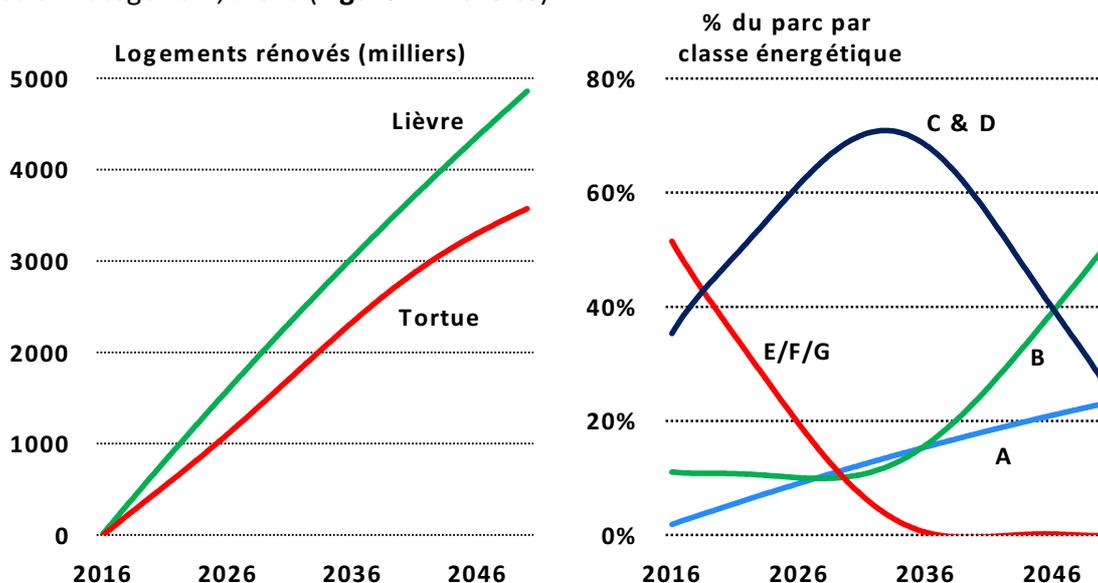


**Figure 73 – Evolution des surfaces habitables**  
**Rouge : données historique Bleu : Marmotte et Tortue Vert : Lièvre**

**Lièvre** prend en compte le faible accroissement démographique anticipé pour les trente prochaines années et considère une croissance de la surface/habitant au même rythme que celle observée depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. La surface par habitant en 2050 est alors de 41 m<sup>2</sup> soit 3m<sup>2</sup> de moins que dans **Marmotte** et **Tortue**. Mécaniquement cela conduit à une réduction de la surface moyenne des logements qui passe de 82 m<sup>2</sup> en 2016 à 76 m<sup>2</sup> en 2050.

**Lièvre** accélère le plan de rénovation de l’habitat à un rythme moyen de 150 000 logements par an contre 108 000 pour **Tortue** (Figure 74 – gauche).

En 2050, 72% de l’habitat belge a été rénové (contre 52% pour **Tortue**). Tous les logements sont passés en catégorie A, B & C (Figure 74 - droite).



**Figure 74– Rénovation du parc de logements (*Lièvre*)  
Comparaison des rythmes de rénovation *Tortue* et *Lièvre***

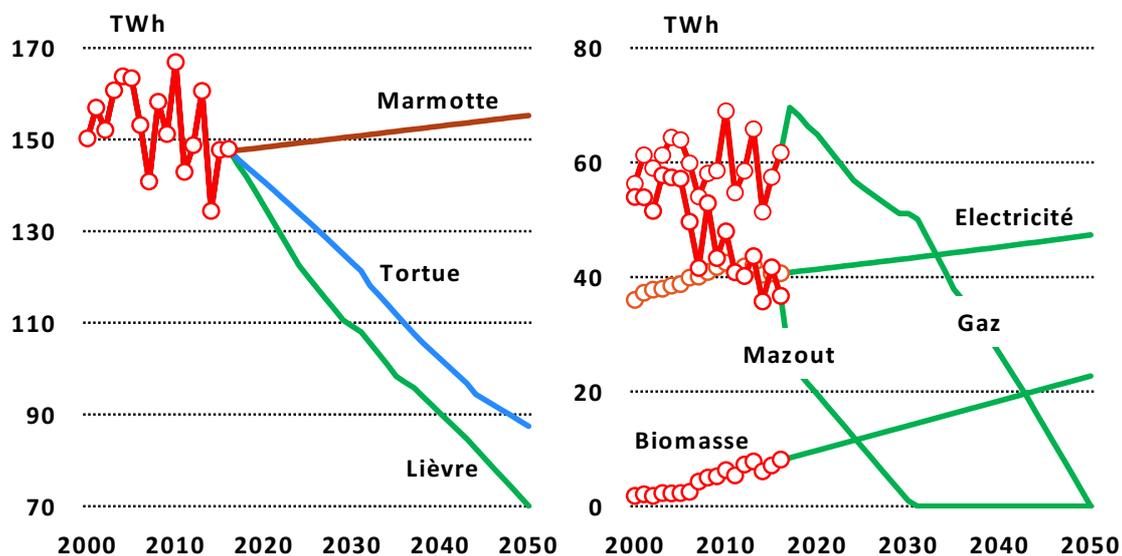
**Lièvre** contracte légèrement l’électricité spécifique de 0,5% par an (elle augmentait pour **Marmotte** et restait stationnaire pour **Tortue**) en accentuant l’utilisation d’équipements basse consommation. Enfin, **Lièvre** suppose une sortie du mazout dans l’habitat dès 2030 (c’était en 2038 pour **Tortue**).

Alors que **Tortue** avait diminué, par rapport à **Marmotte**, de près de 50% la consommation d’énergie finale dans l’habitat, **Lièvre** la contracte de seulement 17 TWh supplémentaires (Figure 75 gauche).

On retrouve appliqué à l’habitat le « **syndrome du pauvre** »<sup>58</sup> : l’isolation des passoires énergétiques s’avère beaucoup plus efficace que l’amélioration de logements déjà correctement isolés. Par rapport à **Tortue** qui avait pris le problème à la racine, **Lièvre** accentue le projet de rénovation de façon incrémentale.

<sup>58</sup> PA. Charlez (2017) « Croissance, énergie, climat. Dépasser la quadrature du cercle » Editions De Boek Supérieur

Par contre l'effort supplémentaire permet une sortie des énergies fossiles en 2050 (**Figure 75 - droite**). Totalemment décarboné, le mix habitat 2050 est alors composé de 68% d'électricité et de 32% de biomasse.



**Figure 75 – Énergie finale dans l'habitat. Comparaison des trois scénarii.  
Evolution du mix habitat (scénario Lièvre)**

Bien que l'électricité spécifique se réduise également (**Figure 76**) les gains de chaleur représentent une fois encore la principale source de réduction de la consommation énergétique de l'habitat. En 2050, l'électricité hors chauffage (électroménager, informatique, éclairage) représente ainsi près de la moitié de l'énergie consommée dans l'habitat. La consommation énergétique des logements abaissée à 7 MWh/an en 2050 pour le scénario **Tortue** est ramenée avec **Lièvre** environ à 5 MWh/an.

**Lièvre** accélère le rythme de déplacement de la consommation de chaleur vers les technologies bas carbone. La sortie du mazout en 2032 augmente légèrement le nombre de chaudière à gaz jusqu'en 2035 mais, par la suite, la croissance significative de la biomasse et des PAC couplées à une réduction de la consommation conduit à une contraction rapide du nombre de chaudières au gaz qui disparaissent à l'horizon 2050.

En 2050, l'habitat est composé de 32% de PAC et de 68% de chaudière fonctionnant à partir de biomasse.

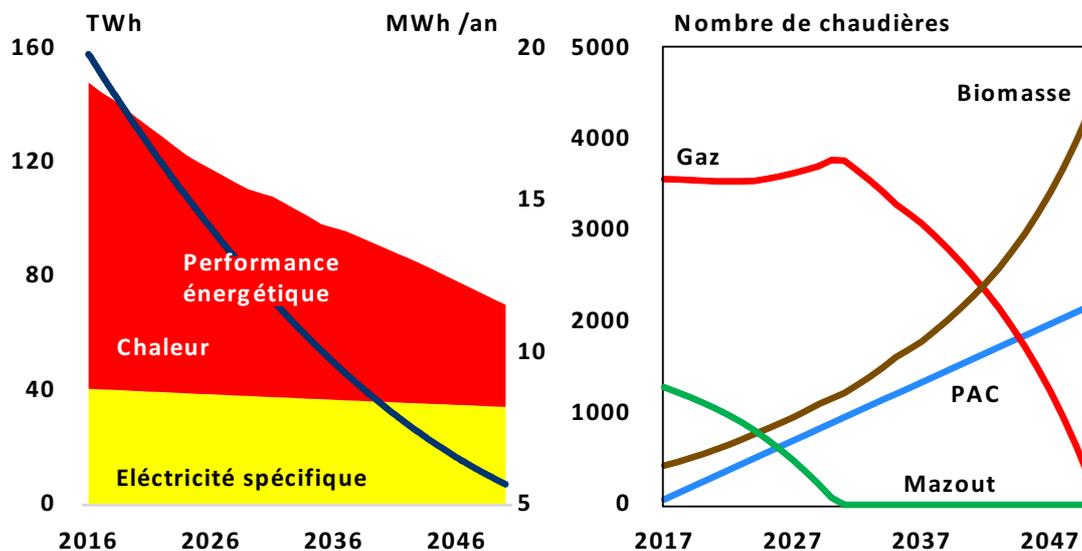


Figure 76 – Evolution de la performance des logements et des installations de chauffage (Scénario *Lièvre*)

Le coût du projet a été calculé avec les mêmes hypothèses que pour le scénario *Tortue*. Le coût cumulé du projet est de 50 milliards d’euros (soit un investissement moyen de 1,5 milliards d’euros /an) pour une économie énergétique cumulée de 285 milliards d’euros.

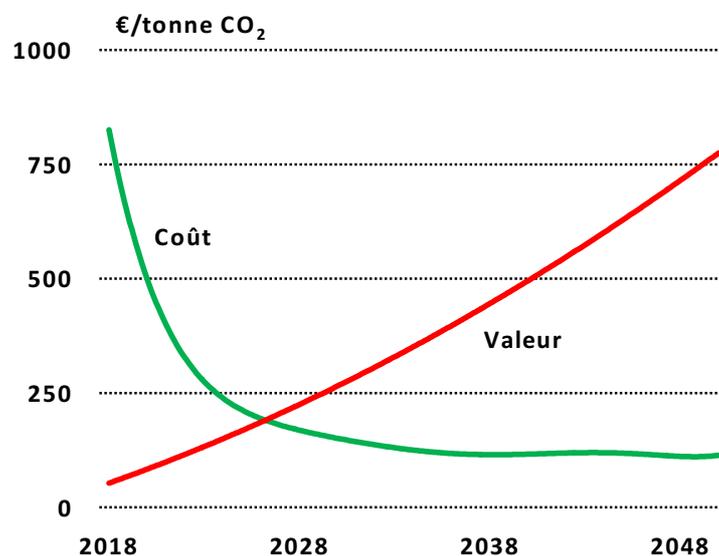


Figure 77 – Coût et valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> non émise (scénario *Lièvre*)

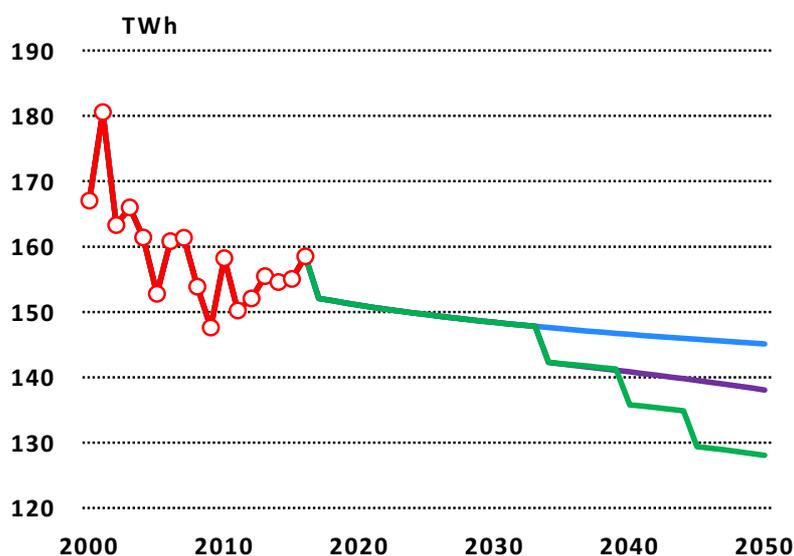
La VAN2% 2050 est égale à 149 milliards d’euros et la VAN10% 2050 à 31 milliards d’euros. Le temps de retour sur investissements reste inchangé (Figure 77). *Lièvre* permet d’économiser 329 Mt<sub>CO2</sub> c’est à dire 60 Mt<sub>CO2</sub> de plus que *Tortue*.

Comme pour **Tortue**, le coût de la tonne de carbone non émise décroît très rapidement et passe au-dessous de la « valeur dans l'action pour le climat » en 2027. En 2050 elle ne coûte plus que 110€.

## INDUSTRIE

Le mix industrie de **Lièvre** ne diffère de celui de **Tortue** que par de la cogénération additionnelle amenée par des unités supplémentaires de gaz à cycle combiné remplaçant les réacteurs nucléaires supprimés en 2040 et en 2045.

Par rapport à **Marmotte**, cette cogénération « mutualisée » entre les différents secteurs de l'industrie permet globalement d'économiser 17 TWh d'énergie finale (**Figure 78**).



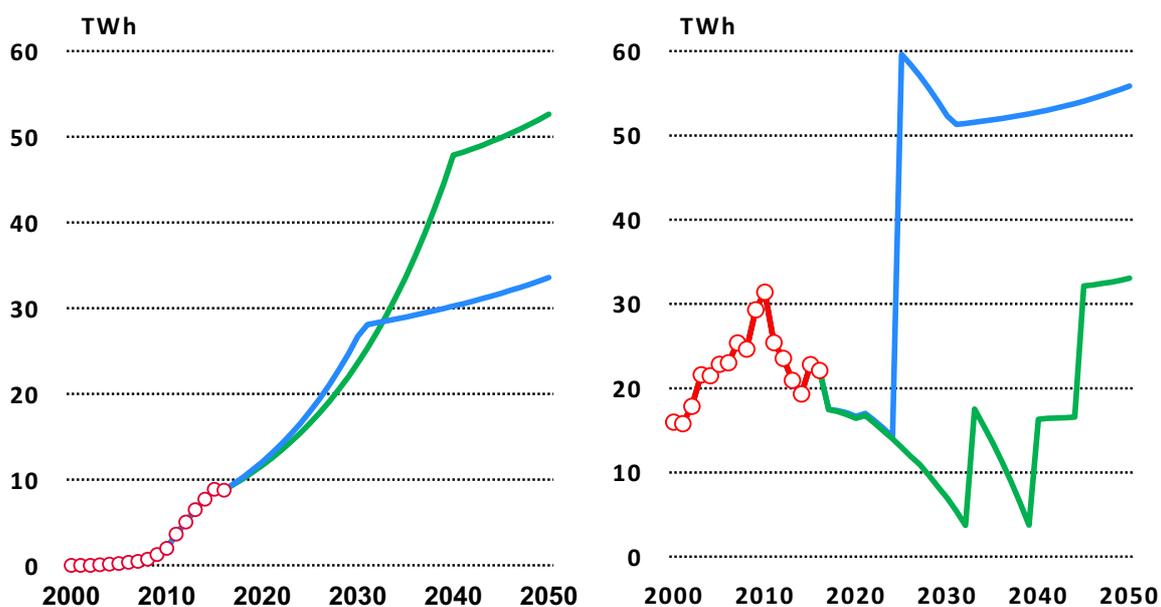
**Figure 78 – Consommation finale d'énergie dans l'industrie**  
 Rouge : données historiques – Bleu : **Marmotte** – Violet : **Tortue** – Vert : **Lièvre**

## GENERATION ELECTRIQUE

Le scénario **Lièvre** diffère des précédents sur deux points. Le premier est une sortie totale (comme dans **Marmotte**) mais progressive du nucléaire. Entamée par un premier retrait de 2 GW en 2033 (comme dans **Tortue**), il se poursuit par un second retrait de 2GW en 2040 puis un dernier (toujours de 2GW) en 2045. La seconde différence par rapport aux deux autres scénarii est d'accroître la part de production électrique renouvelable jusqu'à 50% (30% d'éolien et 20% de solaire) à l'horizon 2040. Cet accroissement mise sur des capacités de stockage d'électricité mais aussi sur un back-up supplémentaire de centrales à gaz pour faire face aux intermittences.

En lissage annuel, la production renouvelable 2050 dépasse alors 50 TWh (contre 33 TWh pour **Marmotte** et **Tortue**) (Figure 79 - gauche).

Cette augmentation significative de la production d'électricité renouvelable implique la mise en œuvre à l'horizon 2050 de 36 GW de puissance renouvelable (contre 22 GW pour **Marmotte** et **Tortue**) soit l'équivalent de 18 000 éoliennes terrestres de 2 MW.



**Figure 79 – Production d'électricité renouvelable (gauche) et gaz (droite)**  
Rouge : données historiques – Bleu : **Marmotte** - Vert : **Lièvre**

La consommation d'électricité 2050 atteint dans **Lièvre** 109 TWh. Elle diffère peu de **Marmotte** (113 TWh) et de **Tortue** (115 TWh). Grâce à une sortie progressive du nucléaire en trois phases successives et à l'introduction de 20% de renouvelables supplémentaires, **Lièvre** réduit très significativement la part du gaz dans la génération électrique (33 TWh) par rapport à **Marmotte** (56 TWh)

Le mix électrique 2050 est alors composé de 30% de gaz, 50% de renouvelables et 18% de biomasse.



L'objectif du projet de loi climat est de porter la production d'électricité renouvelable à 30% en 2030 et à 100% en 2050. La plate-forme transition énergétique FABI a retenu l'objectif 2030 mais pas l'objectif 2050 considérant qu'il n'était pas atteignable et ce même avec des moyens de stockage massifs dont la faisabilité à moyen terme n'est en rien assurée.

Les ENR qui sont intermittentes ne permettent en aucun cas (1) de fournir la puissance réclamée par les consommateurs aux heures de pointe, (2) de suivre la demande en effectuant les variations de production nécessaires (3) de participer au maintien de la tension et de la fréquence et (4) d'augmenter sa puissance courante en cas d'évènement grave.

En conséquence, la plate-forme transition énergétique FABI a retenu une proportion maximum de 50% d'ENR. Sans aucun moyen de stockage, la proportion d'ENR injectable dans le réseau ne doit pas excéder 30%.

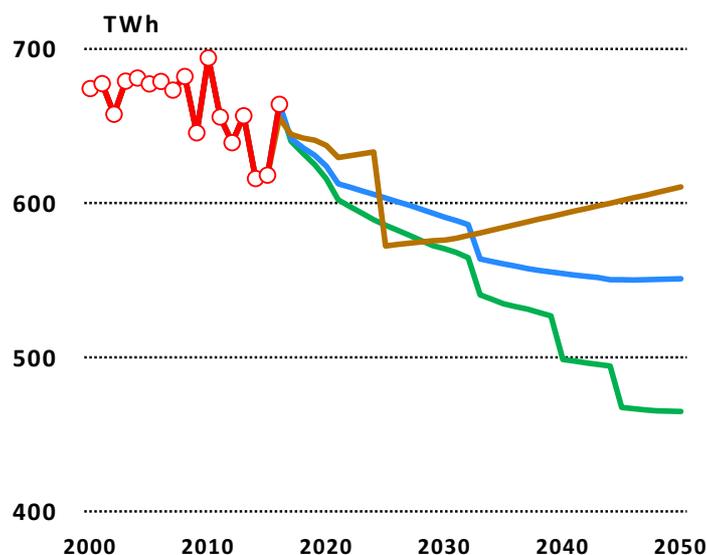
Par ailleurs, une proportion de renouvelables supérieure à 20% sans capacité de stockage pose un problème de viabilité économique dans un marché ouvert<sup>59</sup> et ce quelque soit le prix de revient du MWh. Il y a en effet souvent confusion entre prix de revient et prix de marché. Même si le prix de revient des ENR est bas, les MWh offerts étant la plupart du temps en déphasage complet avec la demande n'ont aucune valeur marchande contrairement aux MWh pilotables dont l'offre peut être aisément adaptée à la demande. Le déploiement massif d'ENR s'avère donc économiquement non viable dans un marché non régulé.

<sup>59</sup> <https://theconversation.com/debat-pour-une-juste-estimation-du-cout-du-tout-renouvelable-114723>



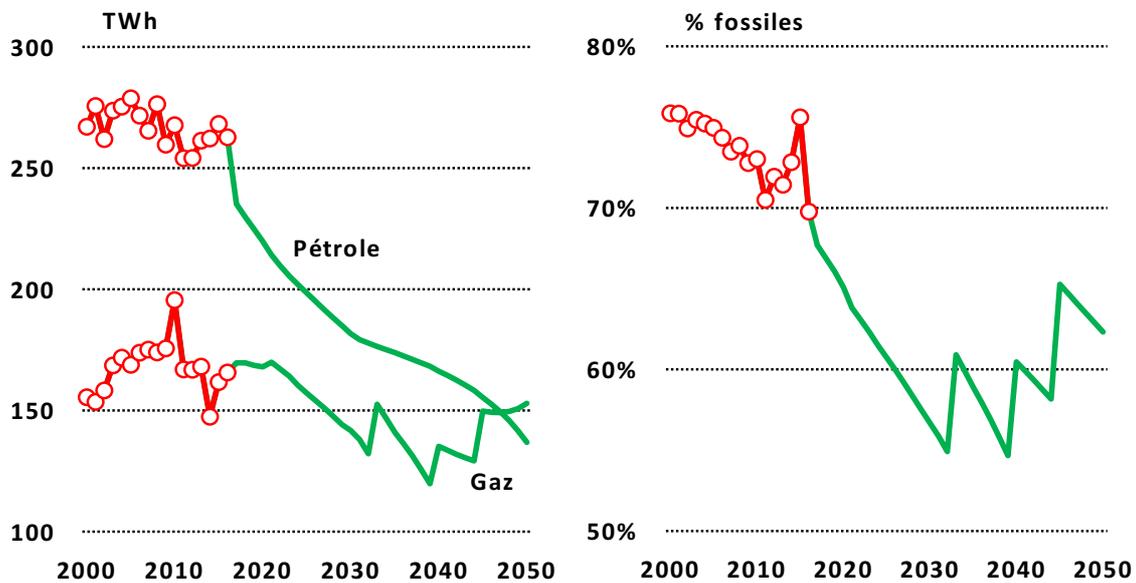
**Lièvre** contracte l'énergie primaire de 30%. Elle passe de 655 TWh en 2016 à 465 TWh en 2050 (**Figure 81**). Le déclin est fortement accentué par le déplacement du nucléaire vers des CC gaz à cogénération au rendement bien supérieur.

Par contre, après avoir décliné durant la période 2020 à 2035 grâce à la rénovation de l'habitat, la sortie du nucléaire accroît la consommation de gaz naturel qui atteint 153 TWh une valeur légèrement inférieure aux 166 TWh consommés en 2016.



**Figure 81 – Consommation d'énergie primaire**  
 Rouge : données historiques - Brun : *Marmotte* – Bleu : *Tortue* - Vert : *Lièvre*

La sortie du nucléaire provoque une augmentation relative de la part des combustibles fossiles qui en 2045 (année de la sortie totale du nucléaire) repasse au-dessus des 65% (**Figure 82**).

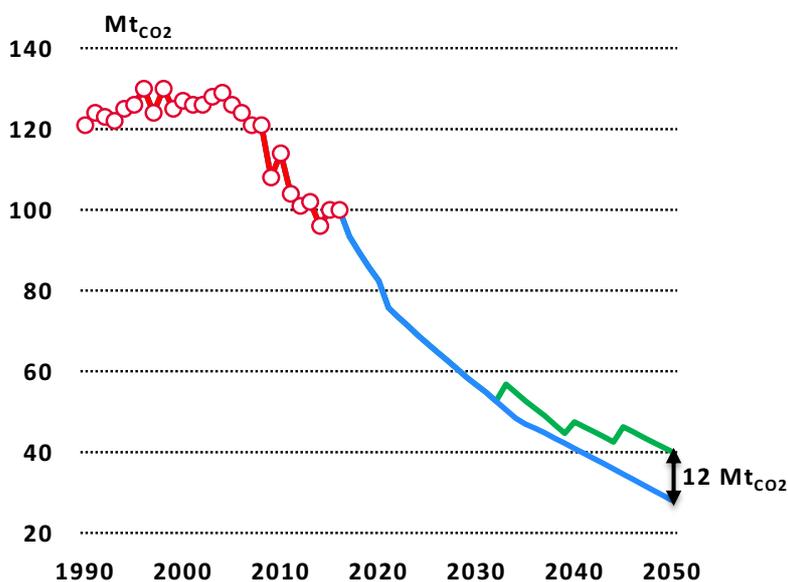


**Figure 82 – Evolution de la consommation et de la part de fossiles dans le scénario *Lièvre***

Il faut toutefois fortement relativiser ce chiffre biaisé par la pétrochimie qui représente alors 40% des hydrocarbures consommés. Sans tenir compte de la pétrochimie, la part des hydrocarbures comptent pour seulement 35% du mix. Quant à la facture d'énergie fossile 2050 elle est réduite à 332 milliards d'euros, soit une économie de 20 milliards d'euros par rapport à *Tortue* et de 95 milliards d'euros par rapport à *Marmotte*.

**EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>**

Le scénario **Lièvre** réduit de 67% les émissions de CO<sub>2</sub> en les ramenant de 121 Mt<sub>CO2</sub> à 40 Mt<sub>CO2</sub> (**Figure 83**). C'est à peine mieux que **Tortue** (43 Mt<sub>CO2</sub>), tous les efforts effectués dans l'habitat, dans les transports et les renouvelables étant presque totalement « gommés » par la sortie totale du nucléaire et la montée en puissance du gaz naturel dans la génération électrique. Si le parc nucléaire avait été intégralement maintenu, les émissions 2050 auraient été de 28 Mt<sub>CO2</sub> soit une réduction de 77% par rapport à la valeur 1990. La sortie du nucléaire engendre donc 12 Mt<sub>CO2</sub> d'émissions supplémentaires. 77% de réduction des émissions est la valeur minimum atteignable dans le cadre des trois scénarios envisagés dans cette étude.



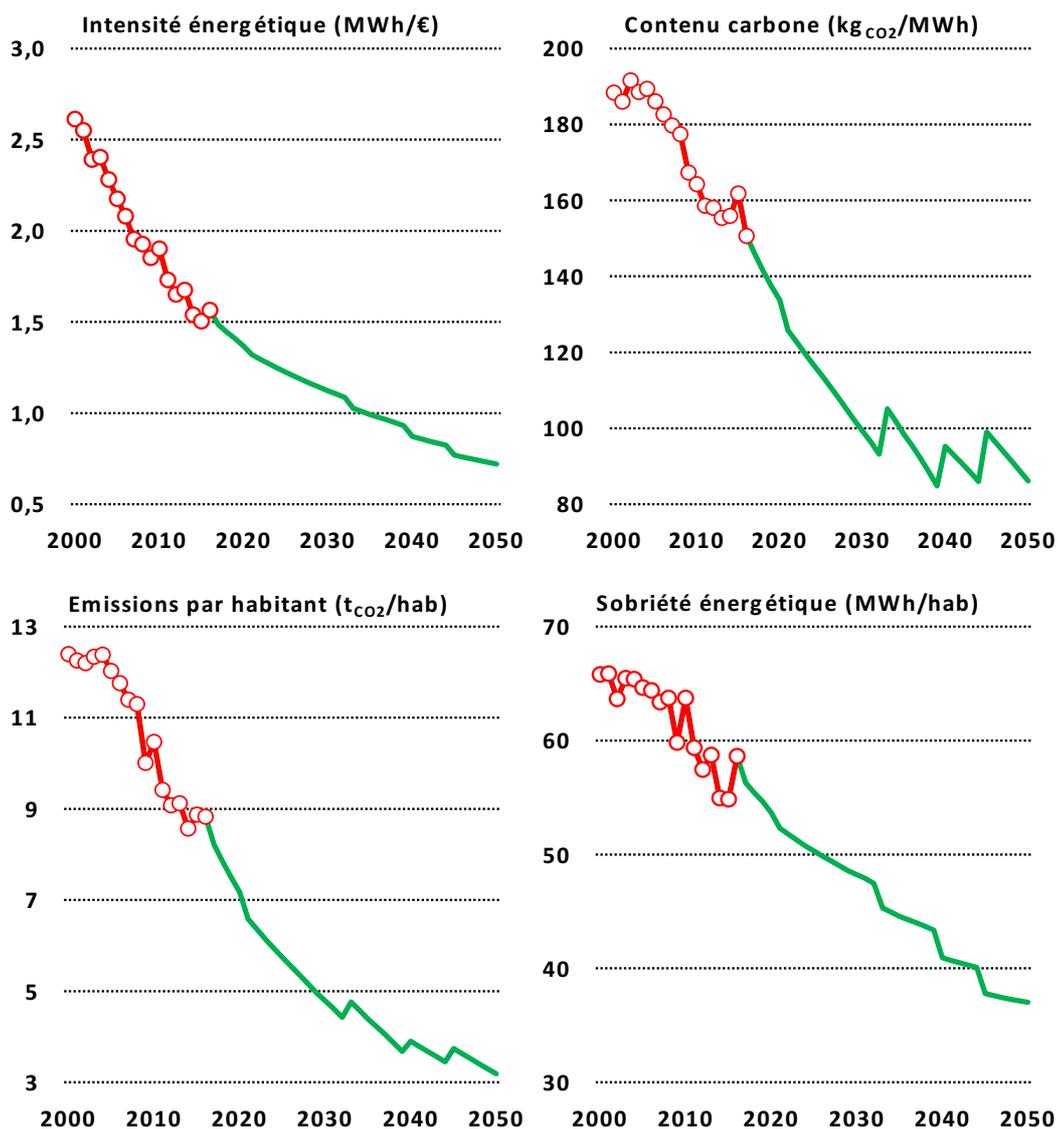
**Figure 83 – Evolution des émissions de CO<sub>2</sub>**  
**Rouge : données historiques – Vert : Lièvre – Bleu : Lièvre avec nucléaire**

**Aucun des trois scénarii ne permet donc d'atteindre la cible de 95% de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> envisagé dans le projet de loi climat.**

**INDICATEURS ENERGETIQUES**

Les indicateurs énergétiques du scénario **Lièvre** sont présentés dans la **Figure 84**.

**Lièvre** accentue les tendances observées dans **Tortue** sur l'intensité énergétique et la sobriété énergétique.



**Figure 84 - Indicateurs énergétiques**  
Rouge : données historiques – Vert : **Lièvre**

Egale à 0,72 kWh/€, l'intensité énergétique 2050 a pratiquement atteint sa valeur asymptotique de 0,7 kWh/€ (elle était de 0,85 kWh/€ pour **Tortue**). En d'autres termes **Lièvre** touche la limite énergétique de la société de croissance. Cette conclusion s'applique également à l'indice de sobriété énergétique qui, à l'horizon 2050, atteint 37 MWh/hab annuels (il valait 44 MWh/hab dans **Tortue**).

Par contre, la sortie du nucléaire dégrade légèrement le contenu carbone qui remonte à 86 kg<sub>CO2</sub>/MWh (contre 80 kg<sub>CO2</sub>/MWh pour **Tortue**). Les émissions par habitant 2050 (3,2 t<sub>CO2</sub>/hab) sont par contre légèrement inférieures à celles obtenues dans **Tortue** (3,5 t<sub>CO2</sub>/hab).

## SYNTHESE

### ***La situation mondiale***

L'humanité a consommé en 2017 157 PWh d'énergie primaire toutes sources confondues dont 85% d'origine fossile. Le mix mondial contenait 34% de pétrole, 28% de charbon et 23% de gaz naturel. Géographiquement, le mix des pays OCDE (81% de fossiles) est moins carboné que celui des pays non NON-OCDE (88% de fossiles).

La combustion de ces énergies fossiles a émis en 2016 33 Gt<sub>CO2</sub> dont 38% en provenance des pays OCDE et 62% en provenance des pays NON-OCDE. Les surémissions des pays NON-OCDE résultent principalement du charbon. Une poursuite de la tendance actuelle conduirait à l'horizon 2050 à un presque doublement des émissions (60 Gt<sub>CO2</sub>).

Les quatre principaux indicateurs énergétiques (intensité énergétique, contenu carbone, émissions par habitant et sobriété énergétique) montrent que les pays NON-OCDE sont bien au-dessus de la moyenne mondiale alors que les pays OCDE sont au contraire systématiquement en dessous de la moyenne mondiale.

L'Europe apparaît comme le meilleur élève mondial bien en dessous de la moyenne mondiale mais aussi de la moyenne des pays de l'OCDE et en particulier des Etats-Unis. Le citoyen américain consomme ainsi en moyenne deux fois plus d'énergie que le citoyen européen et émet deux et demi fois plus de CO<sub>2</sub>.

### ***La ligne de référence***

En 2016, la Belgique a consommé 655 TWh d'énergie primaire dont 70% d'énergies fossiles. Depuis le début du siècle, son mix n'a que faiblement évolué.

Ses émissions sont passées de 121 Mt<sub>CO2</sub> en 1990 à 100 Mt<sub>CO2</sub> en 2016. La tendance baissière est pour l'essentiel liée à la réduction de la part de charbon ainsi qu'à une contraction modérée de son industrie.

Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, l'intensité énergétique belge a décliné de 2,61 MWh/k€ à 1,54 MWh/k€. Le contenu carbone est passé de 188 kg<sub>CO2</sub>/MWh à 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh et les émissions par habitant de 12,4 t<sub>CO2</sub>/hab à 8,8 t<sub>CO2</sub>/hab.

Quand on la compare à ses pairs européens, la Belgique apparaît pourtant à la traîne excepté au niveau de son MWh qui, grâce à sa génération électrique nucléaire, est l'un des moins carbonés d'Europe. Davantage que ses émissions de CO<sub>2</sub>, le premier problème de la Belgique est donc son efficacité énergétique.

La Belgique a consommé en 2016 87 TWh d'électricité. Son mix électrique est majoritairement nucléaire. Depuis le début du siècle la part du nucléaire (52%) a toutefois été réduite au profit du gaz (26%), des renouvelables (11%) et de la biomasse (7%). Le nucléaire possède un facteur de charge de presque 90% contre un peu plus de 10% pour le solaire et 28% pour l'éolien. Cette valeur supérieure à la moyenne européenne est due à la partie significative de l'éolien off-shore. Depuis 2000, la Belgique est un importateur net d'électricité ce qui la rend particulièrement vulnérable vis-à-vis de ses fournisseurs étrangers. Une politique énergétique la mettant à l'abri de ce risque est donc hautement souhaitable.

La Belgique dédie son énergie à 4 usages principaux : les transports, l'habitat, l'industrie et la pétrochimie. Comme pour la consommation globale, la répartition par usages n'a que faiblement évolué depuis le début du siècle.

En 2016, les transports ont consommé 104 TWh et comptaient pour 21% de la consommation d'énergie finale. Les hydrocarbures liquides y règnent en « *maître absolu* » représentant 93% de la consommation.

L'habitat a consommé en 2016 147 TWh soit 29% de la consommation d'énergie finale. L'habitat est dominé par le gaz naturel (42%), l'électricité (27%) et le pétrole sous forme de mazout (25%). La biomasse compte pour 5% alors que le charbon a pratiquement disparu. En 2016, la Belgique comptait 5,35 millions de logements dont 1,67 millions en Wallonie, 3,1 millions en Flandre et 567 000 dans la région Bruxelloise. D'une façon générale le parc belge est très vétuste. La moitié de ses logements sont antérieurs aux années 1960 et un quart antérieur aux années 1920. Toutefois, le parc flamand est de 20 années plus récent que le parc wallon. Quant à l'habitat Bruxellois 75% du parc est antérieur aux années 1960 et 50% antérieur aux années 40. La surface moyenne des logements belges est de 82 m<sup>2</sup> ce qui correspond à 38 m<sup>2</sup> par occupant, une surface inférieure à celle des français qui est de 42 m<sup>2</sup>/habitant. Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle le parc immobilier s'est accru de 41 000 nouveaux logements par an.

La part de l'industrie s'est significativement contractée en Belgique depuis 2000 au profit des services. En 2016, elle ne comptait plus que pour 20% de son PIB mais représentait 31% de la consommation d'énergie finale.

La pétrochimie est une utilisation non énergétique des énergies fossiles. Elle représentait en 2016 19% de la consommation d'énergie finale. Les hydrocarbures utilisés étant « *transformés* » mais non « *brûlés* », ils n'émettent pas de gaz à effet de serre.

## Scénarios prospectifs 2050

Trois scénarios horizon 2050 ont été proposés dans cette étude : **Marmotte, Tortue & Lièvre**. Les données de croissances démographique (0,3% par an constant 2050) et économique (1,5% entre 2017 et 2020 et 1,2% constant entre 2020 et 2050) sont communes aux trois scénarios. Ces hypothèses conduisent en 2050 à une population de 12,5 millions d'habitants et à un PIB de 644 milliards d'euros (contre 424 milliards d'euros en 2016).

### Marmotte

Ce premier scénario prolonge sans modification majeure l'évolution du mix énergétique actuel dans une démarche « *business as usual* ».

Les transports n'évoluent que faiblement en introduisant 10% de voitures électriques et 10% d'utilitaires au gaz. La consommation des voitures thermiques ne diminue que d'un litre/100 km. **Marmotte** n'introduit pas d'hydrogène dans le mix transport. Le scénario conduit à une réduction de 25% de la consommation de pétrole dans les transports.

**Marmotte** ne rénove pas l'habitat ancien. La consommation finale de l'habitat augmente faiblement de 148 TWh en 2016 à 155 TWh en 2050. Malgré l'introduction de pompes à chaleur dans les logements neufs, la chaleur moyenne consommée par un logement ne décroît que marginalement passant de 20,5 MWh/an à 19,5 MWh/an. En 2050, le gaz représente plus de la moitié de l'énergie consommée dans l'habitat contre 34% pour l'électricité et 15% pour la biomasse dont la part a été multipliée par trois.

Dans l'industrie, **Marmotte** prolonge jusqu'en 2050 la tendance baissière de consommation observée depuis le début du siècle. Ne considérant pas de rupture technologique majeure à moyen terme, ce déclin est simplement soutenu par une amélioration incrémentale de l'efficacité énergétique dans les procédés et les organisations industrielles. La consommation totale passe ainsi de 159 TWh en 2016 à 145 TWh en 2050.

Dans la pétrochimie, **Marmotte** extrapole à l'horizon 2050 le trend 2000 à 2016. Cette hypothèse conduit à des consommations pétrolière et gazière respectivement de 111 TWh et 17 TWh.

En ce qui concerne la génération électrique, le scénario « **Marmotte** » repose sur deux hypothèses principales : une sortie totale et brutale du nucléaire en 2025 au profit de centrales gaz CC et la poursuite de la politique actuelle de mise en œuvre des renouvelables pour atteindre en 2030 30% de production renouvelable intermittente ce qui correspond à une production renouvelable cumulée de 33 TWh à l'horizon 2050. Le scénario **Marmotte** conduit à un accroissement de la demande électrique de 30%. Il est dû à la croissance du rail, à l'introduction de voitures électriques et à la mise en œuvre de PACs dans le nouvel habitat. Le « *prix à payer* » pour sortir du nucléaire est une augmentation très significative du gaz dans la

génération électrique dont la part passe de 22 TWh en 2016 à 56 TWh en 2050. La production électrique 2050 se compose de 52% de gaz, 30% d'éolien et de solaire et 18% de biomasse.

**Marmotte**, conduit à une légère augmentation de la consommation d'énergie finale (+3%) mais grâce au gaz CC, la consommation d'énergie primaire se réduit en passant de 655 TWh en 2016 à 610 TWh en 2050. En part du mix, les énergies fossiles représentent en 2050 75% (contre 70% en 2016). Le mix énergétique primaire est alors composé de 33% de pétrole, 42% de gaz, 5% de renouvelables et 19% de biomasse.

Entre 1990 (121 Mt<sub>CO2</sub>) et 2050 (83 Mt<sub>CO2</sub>), les émissions belges auront baissé de 30%. **Marmotte** est évidemment très loin à la fois des objectifs européens et du projet de loi climat.

**Marmotte** réduit l'intensité énergétique 2050 à 0,95 MWh/k€ une valeur encore bien supérieure à la valeur asymptotique cible de 0,7 MWh/k€. Le contenu carbone décline de 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh à 136 kg<sub>CO2</sub>/MWh de même que les émissions par habitant qui passent de 8,8 t<sub>CO2</sub> à 6,6 t<sub>CO2</sub>. **Marmotte** améliore la sobriété énergétique du Belge qui, en 2050, est de 49 MWh annuel (contre 58 MWh en 2016).

## Tortue

**Tortue** repose sur un changement profond du mix énergétique belge. Il s'appuie davantage sur la technologie que sur un bouleversement des comportements individuels.

Grâce au développement du covoiturage (1,56 à 2 passagers par voiture) et à un transfert additionnel des passagers vers le rail électrifié, le parc de voitures ne s'accroît plus. **Tortue** n'encourage pas plus que **Marmotte** les biocarburants dont la part absolue reste constante à 5 TWh/an.

**Tortue** introduit à l'horizon 2050 25% de voitures électrique & hybrides et 40% d'utilitaires au gaz. Une R&D agressive des constructeurs automobiles permet de réduire la consommation des voitures thermiques à 4l/100 km. Par contre **Tortue** maintient la vitesse sur autoroute à 120 km/h et n'introduit que marginalement le gaz naturel et l'hydrogène dans les transports. **Tortue** réduit de 70% la part du pétrole dans les transports (elle passe de 98 TWh en 2016 à 32 TWh en 2050). Le mix est ainsi composé en 2050 de 50% de produits pétroliers, de 24% de gaz, de 19% d'électricité et de 5% de biocarburants. Quant aux 1,1 millions de véhicules électriques ils consomment 1,75 TWh d'électricité. C'est seulement 1,5% de la consommation globale d'électricité. L'analyse confirme que le principal frein technique à l'accroissement massif de voitures électriques est l'appel de puissance et non pas la consommation.

**Tortue** entreprend un plan ambitieux de rénovation de l'habitat mais modernise en priorité les logements les plus énergivores (E/F/G). Ainsi, les 50% de logements E, F et G sont isolés aux normes D et C puis progressivement à la norme B. Vers 2045, tous les logements E, F & G ont disparu du parc. **Tortue** permet de réduire de presque moitié la quantité d'énergie consommée dans l'habitat qui passe de 148 TWh en 2016 à 87 TWh en 2050.

La part du gaz y est divisée par 6. En 2050, le mix habitat contient 13% de gaz, 26% de biomasse et 61% d'électricité. La part de la chaleur par logement est divisée par trois et passe de 20 MWh/an en 2016 à 7 MWh/an en 2050. Le coût cumulé du projet est de 41 milliards d'euros (soit un investissement moyen de 1,2 milliards d'euros /an) pour une économie énergétique cumulée de 217 milliards d'euros. Les Valeurs Actualisées Nettes 2% & 10% des projets en 2050 sont respectivement égales à 110 milliards d'euros et 21 milliards d'euros. Le temps de retour sur investissement (VAN>0) est de l'ordre de 8 ans. Le projet permet d'économiser 260 millions de tonnes cumulées de CO<sub>2</sub>. Le projet habitat crée environ 10 000 emplois pérennes dans le bâtiment.

Le mix industriel de **Tortue** est globalement similaire à celui de **Marmotte**. Ne disposant pas davantage de ruptures technologiques dans les procédés et les organisations, le mix industriel n'évolue que de façon incrémentale. Toutefois, **Tortue** profite de l'opportunité des nouvelles centrales au gaz pour mettre en œuvre de la cogénération partagée répartie de façon homogène entre les différents secteurs industriels. La cogénération permet de récupérer 20% de l'énergie primaire injectée dans la génération électrique gazière.

**Tortue** ferme les trois réacteurs nucléaires les plus anciens<sup>60</sup> en 2033. La progression des **ENergies R**enouvelables (ENR - 30%) est identique à **Marmotte**. Aussi, les 2GW nucléaires retirés sont déplacés vers des centrales à gaz Cycle Combiné (CC) & cogénération dédiée à l'industrie. La consommation d'électricité 2050 atteint 115 TWh en légère augmentation (+2TWh) par rapport à **Marmotte**.

La consommation d'énergie finale décroît significativement passant de 509 TWh à 423 TWh soit un déclin de 17%. En ligne avec l'évolution de l'énergie finale, **Tortue** contracte l'énergie primaire qui passe de 655 TWh à 551 TWh. La sortie partielle du nucléaire accroit la réduction d'énergie primaire dans la mesure où les réacteurs nucléaires sont remplacés par des unités CC à cogénération possédant un rendement bien supérieur. En absolu, la consommation de pétrole est réduite de plus de 100 TWh tandis que la consommation de gaz se stabilise entre 145 TWh et 150 TWh en fin de cycle. En part du mix, **Tortue** réduit significativement la consommation d'énergie fossile par rapport à **Marmotte**. En 2050, le mix belge contient 54% de fossiles (contre 75% pour **Marmotte**). Le scénario **Tortue** débouche sur un mix énergétique primaire composé de 28% de pétrole, 26% de gaz, 17% de nucléaire, 7% de renouvelables et 21% de biomasse. Les énergies fossiles restent donc largement prépondérantes.

Le scénario **Tortue** réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 64% en les faisant passer sur la période 1990 à 2050 de 121 Gt<sub>CO2</sub> à 43 Gt<sub>CO2</sub>. Si le parc nucléaire avait été intégralement maintenu, ces émissions auraient été réduites de 7 Mt<sub>CO2</sub> supplémentaires. Globalement, un GW nucléaire supprimé engendre environ 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> supplémentaires.

**Tortue** réduit d'un facteur 2 l'intensité énergétique qui passe de 1,54 kWh/€ en 2016 à 0,85 kWh/€ en 2050 se rapprochant par la même occasion de la valeur asymptotique de 0,7 kWh/€.

<sup>60</sup> C'est-à-dire Doel1, Doel2 et Tihange 1.

Le contenu carbone passe de 153 kg<sub>CO2</sub>/MWh à 80 kg<sub>CO2</sub>/MWh et les émissions par habitant de 8,8 t<sub>CO2</sub>/hab à 3,5 t<sub>CO2</sub>/hab. Enfin, **Tortue** améliore sensiblement la sobriété énergétique du Belge qui passe de 58 MWh/hab à 44 MWh/hab. Contrairement aux indicateurs « carbone », la sortie partielle du nucléaire améliore la sobriété énergétique.

## Lièvre

**Lièvre** est le scénario le plus avancé. Il superpose aux changements technologiques des changements sociétaux significatifs.

Par rapport à **Tortue**, le parc de voitures individuelles se réduit de 0,7% par an à partir de 2017. En 2050, le nombre de voitures individuelles a ainsi été réduit de 20% par rapport à 2016. En complément des déplacements vers le rail et du covoiturage successivement considérés dans **Marmotte** et **Tortue**, **Lièvre** compense le déficit de km grâce au télétravail et/ou au coworking partiels. En termes de temps, la réduction de 20% du parc de voitures individuelles correspond environ à un jour par semaine de télétravail et/ou de coworking

La croissance absolue des voitures électriques est identique mais sa part relative augmente mécaniquement de 25% à 35%. **Lièvre** n'encourage pas plus que **Marmotte** et **Tortue** les biocarburants dont la part absolue reste constante à 5 TWh/an (valeur 2016). **Lièvre** introduit 5% de véhicules gaz naturel & hydrogène (pile à combustible) consommant 0,5 TWh d'hydrogène produit à partir de l'électrolyse de l'eau et d'électricité provenant d'excédents d'énergies renouvelables non consommés. En 2050, le parc automobile est constitué de 50% de véhicules thermiques, de 45% de véhicules électriques et hybrides et de 5% de véhicules gaz naturel & hydrogène. Enfin, **Lièvre** réduit dès 2025, la vitesse sur autoroute à 100 km/h ce qui permet d'atteindre un plancher de consommation de 3l/100km pour les voitures thermiques. Comme pour **Tortue**, **Lièvre** fige le nombre d'utilitaires à sa valeur 2016 et transfère les tonnes\*km vers le rail. Entre 2016 et 2050, la consommation d'énergie finale dans les transports est réduite de moitié passant de 104 TWh à 57 TWh dont seulement 13 TWh de pétrole soit six fois moins que **Marmotte**. La part du pétrole dans les transports est alors tombée à 23%. Le gaz (massivement introduit dans les utilitaires) représente 45% de la consommation, l'électricité 22%, la biomasse 9% et l'hydrogène 1%.

Compte tenu du faible accroissement démographique, **Lièvre** considère que la surface/habitant croît au même rythme que celui observé depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. Cela conduit à une réduction de la surface moyenne des logements qui passe mécaniquement de 82 m<sup>2</sup> en 2016 à 76 m<sup>2</sup> en 2050. **Lièvre** accélère le plan de rénovation de l'habitat avec un rythme moyen de 150 000 logements par an contre 108 000 pour **Tortue**.

En 2050, 72% de l'habitat belge a ainsi été rénové et, tous les logements sont en catégorie A, B ou C. **Lièvre** ne contracte que de 17 TWh la consommation d'énergie finale par rapport à **Tortue** mais permet de sortir les énergies fossiles de l'habitat. Le mix habitat 2050 est composé de 68% d'électricité et de 32% de biomasse. La consommation énergétique des logements est abaissée

sous le seuil des 5 MWh/an. Le coût cumulé du projet est de 50 milliards d'euros (soit un investissement moyen de 1,5 milliards d'euros /an) pour une économie énergétique cumulée de 285 milliards d'euros. La VAN2% 2050 est égale à 149 milliards d'euros et la VAN10% 2050 à 31 milliards d'euros. Le temps de retour sur investissements reste inchangé. **Lièvre** permet d'économiser dans l'habitat 329 Mt<sub>CO2</sub> c'est à dire 60 Mt<sub>CO2</sub> de plus que **Tortue**.

Le mix industrie ne diffère de celui de **Tortue** que par de la cogénération additionnelle amenée par des unités supplémentaires de gaz à cycle combiné remplaçant les réacteurs nucléaires arrêtés en 2040 et 2045. Par rapport à **Marmotte**, cette cogénération « mutualisée » entre les différents secteurs de l'industrie permet globalement d'économiser 17 TWh d'énergie finale.

**Lièvre** sort totalement du nucléaire à l'horizon 2050 et accroît la part d'électricité renouvelable de 30% à 50% et ce dès 2040. Le complément est déplacé vers des centrales à gaz CC avec cogénération. La chaleur issue de la cogénération est entièrement dédiée à l'industrie. La consommation d'électricité 2050 atteint 109 TWh finalement très peu différente de **Marmotte** et de **Tortue**. En sortant du nucléaire **Lièvre** accroît un peu la part du gaz dans la génération électrique qui passe à 33TWh. La génération électrique 2050 est alors composée de 30% de gaz, 50% d'ENR et 18% de biomasse le complément étant importé.

Entre 2016 et 2050 **Lièvre** réduit la consommation d'énergie finale de l'ordre de 25% en la faisant passer de 509 TWh à 395 TWh tandis que l'énergie primaire se contracte de 30% (465 TWh en 2050). La consommation de pétrole diminue de moitié passant de 263 TWh à 137 TWh dont 111 TWh de pétrochimie. La consommation « énergétique » du pétrole ne représente plus en 2050 que 26 TWh soit 6% du mix. Par contre, la sortie du nucléaire maintient la part du gaz naturel à 153 TWh, une valeur à peine inférieure à celle de 2016. En fin de cycle, la part des combustibles fossiles est de 62%. Il faut toutefois fortement relativiser ce chiffre biaisé par la pétrochimie. Sans tenir compte de la pétrochimie, la part des hydrocarbures compte pour seulement 39% du mix.

Le scénario **Lièvre** réduit de 67% les émissions de CO<sub>2</sub> en les ramenant de 121 Mt<sub>CO2</sub> à 40 Mt<sub>CO2</sub>. C'est à peine mieux que **Tortue** (43 Mt<sub>CO2</sub>) : tous les efforts effectués dans l'habitat et les transports sont presque totalement « gommés » par l'arrêt du nucléaire remplacé par le gaz naturel. Si le parc nucléaire avait été intégralement maintenu, les émissions 2050 auraient été de 28 Mt<sub>CO2</sub> soit une réduction de 77% par rapport à la valeur 1990. La sortie du nucléaire engendre donc 12 Mt<sub>CO2</sub> supplémentaires.

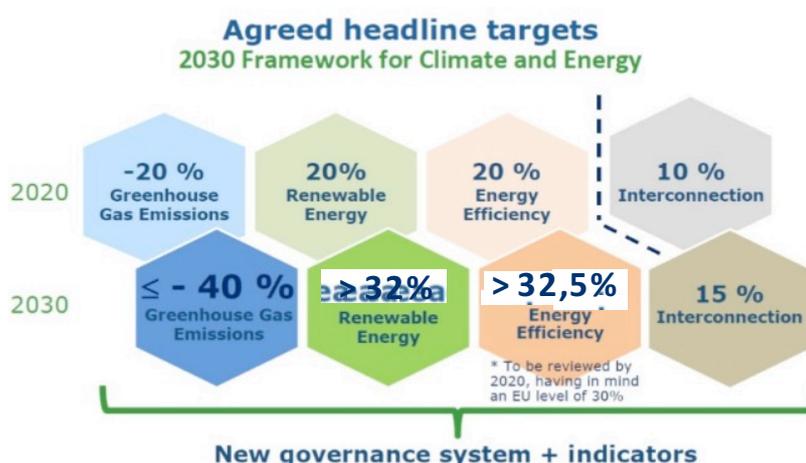
En 2050, l'intensité énergétique (0,72 kWh/€) a pratiquement atteint sa valeur asymptotique de 0,7 kWh/€. En d'autres termes **Lièvre** touche la limite énergétique de la société de croissance. Cette conclusion s'applique également à l'indice de sobriété énergétique qui, à l'horizon 2050, passe à 37 MWh/hab annuels. Par contre, la sortie du nucléaire dégrade légèrement le contenu carbone qui remonte durant les années 2040 à 86 kg<sub>CO2</sub>/MWh. Les émissions par habitant 2050 (3,2 t<sub>CO2</sub>/hab) sont en revanche légèrement inférieures à celles de **Tortue** (3,5 t<sub>CO2</sub>/hab).

## ANNEXE 1 : CADRE UE ENERGIE ET CLIMAT HORIZON 2030

Les pays de l'Union Européenne (UE) se sont accordés en octobre 2014 sur un « *Cadre pour l'énergie et le climat à l'horizon 2030* »<sup>61</sup>.

Il a pour but d'aider l'Union à mettre en place un système énergétique plus compétitif, plus sûr et plus durable et à réduire ses émissions de gaz à effet de serre conformément à l'objectif fixé pour 2050.

Il comprend des objectifs généraux et des objectifs chiffrés en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, d'énergies renouvelables, d'efficacité énergétique et d'interconnexion électrique (**Figure 85**).



**Figure 85 - Cadre UE 2030 climat et énergie**

Les objectifs chiffrés pour l'année 2030 sont les suivants :

- ✓ une réduction d'au moins 40% des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux de 1990,
- ✓ une part d'au moins 32% pour les énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie
- ✓ une amélioration d'au moins 32,5% de l'efficacité énergétique (par rapport au niveau de référence de 2007)
- ✓ le défi de l'interconnexion européenne (15%) concerne tous les secteurs et tous les types d'infrastructures de transport d'énergie.

<sup>61</sup> [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr)

Le cadre a été adopté par tous les dirigeants européens. Comme ses confrères européens, la Belgique s'est engagée à définir et à mettre en place une stratégie de développement bas carbone.

La stratégie belge s'inscrit également dans le cadre des négociations internationales sous l'égide des Nations Unies au sein desquelles l'UE s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 80 à 95% à l'horizon 2050 par rapport à leur niveau de 1990 ceci en vue de « *contenir l'élévation de température largement sous les 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle et même de viser à limiter cette élévation à 1,5°C* ».

Une approche concertée pour la période allant jusqu'en 2030 contribue à garantir la sécurité juridique et financière pour les investisseurs et à coordonner les efforts des pays de l'Union.

Ce cadre européen contribue à faire progresser l'économie vers une économie à faible émission de carbone et à construire un système énergétique qui :

- ✓ garantit une énergie abordable pour tous les consommateurs,
- ✓ accroît la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'UE,
- ✓ réduit notre dépendance à l'égard des importations d'énergie,
- ✓ crée de nouvelles opportunités pour la croissance et l'emploi.

Ce cadre présente également des avantages pour l'environnement et la santé en réduisant par exemple la pollution de l'air (notamment en particules fines dans les grandes villes).

## ANNEXE 2 : INNOVATION & RECHERCHE EUROPEENNES

Au sein d'HORIZON 2020<sup>62</sup> (plus grand programme de recherche et d'innovation jamais réalisé par l'Union européenne – 80 milliards d'euros sur 7 ans), le secteur de l'énergie est financé à hauteur de 6 milliards d'euros sur 7 ans. A ce dernier montant, il faut ajouter 1, 6 milliards d'euros consacrés à la recherche nucléaire (fission et fusion).

Il faut rappeler que l'Europe est très dépendante du reste du monde en ce qui concerne sa consommation énergétique et l'utilisation de ses matières premières. La recherche et l'innovation visent notamment à atteindre les objectifs ambitieux que l'UE s'est fixés en matière de climat. Énergie sûre, propre et efficace, transports intelligents, verts et intégrés, action climatique, environnement et efficacité des ressources et matières premières font partie intégrante du projet HORIZON 2020.

HORIZON 2020 met l'accent sur des thèmes qui répondent directement aux priorités politiques actuelles de la Commission :

- (1) avenir à faible intensité carbone, résilience face au changement climatique (3,3 milliards d'euros)
- (2) économie circulaire (1 milliard d'euros)
- (3) transition numérique, transformation de l'industrie et des services (1,7 milliards d'euros)

Un montant de 2,2 milliards d'euros sera consacré à des projets liés à l'énergie propre dans quatre domaines connexes : les énergies renouvelables, les bâtiments économes en énergie, l'électromobilité et les solutions de stockage, dont 200 M€ pour soutenir le développement et la production en Europe de la prochaine génération de batteries électriques.

Dans le domaine de la fission nucléaire, le programme est notamment axé sur la sûreté et la sécurité, la recherche médicale, la protection contre les radiations et la gestion des déchets. L'UE apporte aussi son soutien au projet MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) initié par le Centre d'Etude de l'Énergie Nucléaire SCK-CEN à Mol. En 2010, la Commission a placé MYRRHA sur la liste hautement prioritaire des grandes infrastructures de recherche sur l'énergie.

En choisissant l'installation belge multifonctionnelle, l'Europe s'assure de demeurer à la pointe de la recherche en matière de sécurité énergétique et dans sa lutte contre le changement climatique.

---

<sup>62</sup>[https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/sites/horizon2020/files/H2020\\_FR\\_KI0213413FRN.pdf](https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/sites/horizon2020/files/H2020_FR_KI0213413FRN.pdf)

## ANNEXE 3 : METHODOLOGIE DE CALCUL DE L'HABITAT BELGE

La répartition 2016 des logements wallons selon leurs performances énergétiques moyennes est la suivante<sup>63</sup>

Catégorie	Logements (milliers)	%
G	519	31%
F	251	15%
E	251	15%
D	251	15%
C	218	13%
B	151	9%
A	33	2%

**Figure 86 – Logements wallons selon leurs performances énergétiques**

Par contre elle n'est disponible ni pour la Flandre ni pour Bruxelles. Connaissant la répartition de l'âge des logements dans les trois régions (**Figure 25**) et considérant la forte corrélation entre l'âge, l'évolution des réglementations thermiques à l'échelle européenne et les performances énergétiques, nous avons recalculé une grille de performances énergétique pour la Flandre et pour Bruxelles.

Pour ce faire, une corrélation a été établie pour la Wallonie (où nous disposons des deux séries de données) entre l'âge et la performance énergétique (**Figure 87**). Ainsi par exemple, cette corrélation montre que 100% des logements wallons antérieurs à 1900 mais aussi 17% de ceux construits entre 1900 & 1918 sont en classe G. De même, 36% des logements construits entre 1971 et 1981, 100% des logements 1982-1991 et 62% des logements 1992-2001 sont en classe C. Quant aux logements construits après 2011, 8% sont en classe B et 92% en classe A.

<sup>63</sup> STRATÉGIE WALLONNE DE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE À LONG TERME DU BÂTIMENT - ACTÉE PAR LE GOUVERNEMENT WALLON LE 20 AVRIL 2017 - SPW | DGO4 | Direction des Bâtiments Durables

Age	Performance énergétique						
	G	F	E	D	C	B	A
< 1900	100%						
1900-1918	17%	83%					
1919-1945		57%	43%				
1946-1961			96%	4%			
1962-1970				100%			
1971-1981				64%	36%		
1982-1991					100%		
1992-2001					62%	38%	
2002-2011						100%	
> 2011						8%	92%

Figure 87 – Corrélation entre l'âge des bâtiments wallons et la grille énergétique.

La grille de la **Figure 87** a alors été appliquée aux parcs flamands et bruxellois de même âge ceci afin de recalculer dans un deuxième temps les grilles de performances énergétiques des parcs flamand et bruxellois (nombre de logements et pourcentage de logements par classe – **Figure 88**)

Classe	Wallonie		Flandre		Bruxelles		Belgique	
	Milliers de logements	%						
G	519	31%	270	9%	96	17%	885	17%
F	251	15%	371	12%	176	31%	798	15%
E	251	15%	626	20%	169	30%	1046	20%
D	251	15%	695	22%	73	13%	1019	19%
C	218	13%	642	21%	30	5%	889	17%
B	151	9%	417	13%	20	4%	588	11%
A	33	2%	90	3%	3	1%	126	2%
Total	1673	100%	3112	100%	567	100%	5352	100%

Figure 88 – Restitution des grilles de performances énergétiques des parcs flamand, bruxellois et belge par analogie avec le parc wallon.

## ANNEXE 4 : TRANSFERT DU TRANSPORT ROUTIER VERS LE RAIL

Le trafic de véhicules individuels et le transport de marchandises se calculent respectivement en passagers\*km, tonnes\*km et véhicules\*km<sup>64</sup>. Les principales données 2016 extraites d'EUROSTATS (pour les passagers\*km et les tonnes\*km) et de STATBEL (véhicules\*km) permettent d'estimer que les voitures individuelles transportent en moyenne 1,56 personnes et les utilitaires 2,06 tonnes de marchandises. Les hypothèses de **Marmotte** (nombre de km constant et croissance du nombre de véhicules) et de **Tortue** (kilométrage décroissance et croissance du nombre de véhicules) permettent d'estimer l'accroissement de passagers\*km (pour le transport de passagers) et tonnes\*km (pour le transport de marchandises) à transférer de la route vers le rail (**Figure 89**). **Tortue** ne considère pas de changement de remplissage des voitures individuelles grâce par exemple au covoiturage.

Véhicules individuels	Passagers*km	Kilométrage moyen (km)	Nombre de véhicules	Véhicules*km	Passagers par véhicule
2016	1,32E+11	1,50E+04	5,65E+06	8,48E+10	1,56
2050 Marmotte	1,87E+11	1,50E+04	8,00E+06	1,20E+11	1,56
2050 Tortue	1,43E+11	1,15E+04	8,00E+06	9,17E+10	1,56
Delta	4,39E+10				

Utilitaires	Tonnes*km	Kilométrage moyen (km)	Nombre de véhicules	Véhicules*km	Tonne par véhicule
2016	3,52E+10	1,93E+04	9,07E+05	1,75E+10	2,01
2050 Marmotte	5,58E+10	1,93E+04	1,44E+06	2,78E+10	2,01
2050 Tortue	3,04E+10	1,05E+04	1,44E+06	1,51E+10	2,01
Delta	2,54E+10				

**Figure 89 – Quantité de transports routiers à déplacer vers le rail**

*Sources des données : STATBEL et Eurostats*

Le trafic des trains s'exprime de façon similaire en passagers\*km pour les trains de passagers, en tonnes\*km pour les trains de marchandises et en train\*km pour le nombre de trains en circulation. Comme le montre la **Figure 90**, en 2016, 83% des trains belges transportaient des passagers et 13% du fret. Ce ratio a été utilisé pour calculer la part de l'énergie total du rail (1,63 TWh en 2016<sup>65</sup>) à affecter au transport de passagers et au FRET. Les valeurs 2050 des passagers\*km et des tonnes\*km de **Tortue** alors ont été calculées en ajoutant les « *Deltas* » de la **Figure 89** aux valeurs 2016 de la **Figure 90**.

<sup>64</sup> Un passager-kilomètre (tonne-kilomètre) est une unité de mesure représentant le transport d'un passager (une tonne de marchandises) par un moyen de transport donné (rail, route, air, mer, voies navigables intérieures) sur une distance d'un kilomètre.

<sup>65</sup> Source des données STATBEL

Rail	Transport passagers			
	Passagers* km	Train*km	Passagers/ train	Conso (TWh)
2016	1,04E+ 10	8,08E+ 07	129	1,41
2050 Tortue	5,44E+ 10	4,22E+ 08	129	7,37

Rail	Transport fret			
	Tonnes*km	Train*km	Fret/train (tonnes)	Conso (TWh)
2016	7,60E+ 09	1,26E+ 07	605	0,22
2050 Tortue	3,30E+ 10	5,45E+ 07	605	0,95

**Figure 90 – Augmentation du transport par rail**  
Sources de données : Eurostats et STATBEL

Pour compenser la réduction du kilométrage par le rail sans changer les coefficients de remplissage, la capacité du rail passager doit être multipliée par 5 et celle du fret par 4.

## ANNEXE 5 : CONSOMMATION MINIMALE DES VOITURES

La poussée nécessaire pour mouvoir un véhicule à vitesse constante est donnée par l'équation :

$$T = (f \cos \gamma + \sin \gamma)mg + c_D A \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

Le premier terme du second membre combine les forces de frottement ( $f$ ) et de gravité due à l'angle ( $\gamma$ ) de la pente. Le second terme représente la force de trainée caractérisée par le coefficient de trainée  $c_D$  et la surface frontale  $A$ . En multipliant la poussée par la vitesse, on obtient la puissance mécanique nette :

$$P = Tv = (f \cos \gamma + \sin \gamma)mgv + c_D A \frac{\rho v^3}{2} \quad (2)$$

Dont on peut déduire l'énergie mécanique requise sur une distance de 100 km. Exprimée en kWh, elle vaut :

$$E_{mech} = \frac{P}{3600} \left( \frac{100\,000}{v} \right) \quad (3)$$

Cette énergie mécanique est reliée à la consommation de combustible par la relation :

$$E_{mech} = \eta_{tr} \eta_{eng} E_{tank} \quad (4)$$

dans laquelle

$\eta_{tr}$  est le rendement de transmission

$\eta_{eng}$  est le rendement du moteur

$E_{tank}$  est l'énergie fournie par le combustible.

Cette dernière peut aussi se calculer par le produit de la consommation  $Q$  et du pouvoir calorifique inférieur  $LHV$ , soit :

$$E_{tank} = Q LHV \quad (5)$$

On peut alors calculer le rendement de moteur nécessaire à une vitesse donnée pour réaliser une consommation imposée :

$$\eta_{eng} = \frac{1}{\eta_{tr}} \frac{E_{mech}}{E_{tank}} \quad (6)$$

Des calculs exploratoires ont été effectués à partir des caractéristiques de l'Audi A4. En réduisant le coefficient de frottement à 1%, et en considérant un rendement de transmission de 98% et un coefficient de trainée abaissé à 0.20, le rendement de moteur requis pour une consommation constante de 3 l/100 km à 100 km/h est légèrement inférieur à 40%. L'économie d'énergie est

réalisée essentiellement par réduction du coefficient de trainée et des forces de frottement. L'objectif pourrait être atteint plus rapidement avec des moteurs diesel dont le rendement est supérieur à celui des moteurs à essence, moyennant un traitement adéquat des fumées. Une réduction supplémentaire de la consommation ne pourra venir que d'une rupture technologique sous la forme d'un nouveau type de moteur et d'une réduction drastique de la masse et de la surface frontale. A l'heure actuelle des efforts de recherche sont consacrés au cycle à allumage de pré-mélange par compression, mais l'application industrielle nécessitera encore de nombreuses années de mise au point. Une forte réduction de la masse imposera quant à elle la mise en œuvre de matériaux composites. Mais elle est susceptible d'accroître fortement les risques encourus par les occupants en cas de collision avec un véhicule conventionnel plus lourd. Enfin, la réduction de la surface frontale se heurte aux exigences de confort et d'accessibilité.

## ANNEXE 6 : COGENERATION

La production combinée de chaleur et d'électricité ou « cogénération » est un moyen efficace d'économiser l'énergie primaire à la condition de répondre harmonieusement aux besoins respectifs.

La Belgique produisait en 2016 84 TWh/an d'électricité pour une consommation d'énergie finale de 509 TWh/an. Cette dernière se partage en 159 TWh/an pour l'industrie (soit 31%) et 148 TWh/an pour l'habitat (soit 20%). Le mix habitat contient par ailleurs 25% de pétrole et 42% de gaz. La consommation d'énergie finale dans l'habitat issue des combustibles fossiles s'élève à 99 TWh/an.

Il est important dans une étude relative à la cogénération de considérer le rapport chaleur/électricité noté  $\varphi$ . Avec les chiffres mentionnés ci-dessus, on distinguera les applications industrielles des applications domestiques à des fins de chauffage parce que les niveaux de température sont très différents. On obtient alors :

$$\varphi_{ind} = \frac{159}{84} = 1.88 \quad \text{pour l'industrie}$$

$$\varphi_{hab} = \frac{99}{84} = 1.17 \quad \text{pour l'habitat}$$

### **Equations de la cogénération**

Les équations de base de la cogénération résultent de l'application du premier principe de la thermodynamique. On désigne respectivement par les symboles  $\alpha_E$  et  $\alpha_Q$  les fractions du flux d'énergie primaire ( $\dot{m}_f LHV$ ) converties en puissance électrique  $P_E$  et en puissance thermique  $P_Q$ . Ce flux d'énergie primaire est le produit du débit de combustible  $\dot{m}_f$  par son pouvoir calorifique inférieur  $LHV$ .

$$\alpha_E = \frac{P_E}{\dot{m}_f LHV} \quad (1)$$

$$\alpha_Q = \frac{P_Q}{\dot{m}_f LHV} \quad (2)$$

Par commodité, on définit le rapport chaleur/électricité  $\varphi$  déjà évoqué dans l'introduction, dont on verra qu'il joue un rôle important dans le calcul de l'économie d'énergie primaire.

$$\varphi = \frac{P_Q}{P_E} = \frac{\alpha_Q}{\alpha_E} \quad (3)$$

Le rendement global de la cogénération  $\eta_{CHP}$  est défini par la relation :

$$\eta_{CHP} = \frac{P_E + P_Q}{\dot{m}_f LHV} = \alpha_E + \alpha_Q \quad (4)$$

L'appellation « rendement global » utilisée en français est abusive parce qu'elle mélange électricité et chaleur dont les facteurs exergetiques (indices de qualité) sont radicalement différents. La dénomination anglo-saxonne « fuel utilisation factor » (facteur d'utilisation du combustible) est beaucoup plus appropriée.

En combinant les relations 1 à 4, on peut exprimer les fractions électrique et thermique en fonction du rendement global et du rapport chaleur/électricité, soit :

$$\alpha_E = \left( \frac{1}{1+\varphi} \right) \eta_{CHP} \quad (5)$$

$$\alpha_Q = \left( \frac{\varphi}{1+\varphi} \right) \eta_{CHP} \quad (6)$$

Il reste alors à comparer la demande d'énergie primaire de la cogénération à celle cumulée des productions séparées d'électricité et de chaleur. On supposera que ces unités de production ont des rendements respectivement égaux à  $\eta_E$  et  $\eta_Q$ . On peut alors calculer l'Economie d'Énergie Primaire (EES), dénommée en anglais « Primary Energy Saving (PES) », à partir des relations suivantes.

Le flux d'énergie primaire des installations séparées  $\dot{Q}_{SPLIT}$  est égal à :

$$\dot{Q}_{SPLIT} = \frac{P_E}{\eta_E} + \frac{P_Q}{\eta_Q} \quad (7)$$

tandis que celui de la cogénération  $\dot{Q}_{CHP}$  est égal à :

$$\dot{Q}_{CHP} = \frac{P_E + P_Q}{\eta_{CHP}} \quad (8)$$

L'économie d'énergie primaire, exprimée en pourcents, se calcule donc avec la formule :

$$PES = \frac{\dot{Q}_{SPLIT} - \dot{Q}_{CHP}}{\dot{Q}_{SPLIT}} \quad (9)$$

dont l'expression finale s'obtient aisément :

$$PES = 1 - \frac{1}{\left( \frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q} \right)} = 1 - \frac{1+\varphi}{\eta_{CHP} \left( \frac{1}{\eta_E} + \frac{\varphi}{\eta_Q} \right)} \quad (10)$$

et permet une étude paramétrique aisée des contraintes de la cogénération.

Toutefois, cette évaluation basée exclusivement sur la conservation de l'énergie (premier principe de thermodynamique) ne tient pas compte de sa dégradation (second principe de thermodynamique) au cours d'une transformation. Il faut donc extraire le fluide caloporteur à des conditions qui satisfassent la demande de chaleur, c'est-à-dire en accord avec les niveaux de température requis. Ceci réduit le nombre de couples compatibles avec un bon fonctionnement de l'installation sélectionnée. Les valeurs de ces paramètres seront différentes pour des moteurs à gaz, des turbines à vapeur à contrepression ou à extraction, des turbines à gaz avec chaudière de récupération, ou des cycles combinés avec extraction de vapeur. A ces contraintes s'ajoute l'indispensable proximité entre l'unité de cogénération et le consommateur de chaleur pour éviter de coûteux investissements en réseau et des pertes thermiques trop importantes au cours du transport et de la distribution.

## ANNEXE 7 : CARBON CAPTURE STORAGE & UTILISATION

Parallèlement au déplacement des énergies fossiles vers les énergies dé carbonées et à la réduction de l'intensité énergétique, le CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) est largement mis en avant dans de nombreux scénarios pour réduire les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et atteindre à terme une empreinte carbone nulle.

Le principe consiste à capter le CO<sub>2</sub> là où les activités humaines en émettent en grandes quantités (centrales thermiques, cimenteries, industrie sidérurgique, pétrochimie...), à le transporter puis soit à l'utiliser soit à l'injecter dans le sous-sol.

### **Capture**

La capture nécessite d'abord de séparer le CO<sub>2</sub> des autres gaz émis au droit des cheminées industrielles. Par exemple, dans une centrale thermique au charbon, les fumées ne contiennent que 15% de CO<sub>2</sub>. Le reste est principalement constitué d'azote provenant de l'air de combustion.

Différentes technologies de capture existent. On peut par exemple absorber le CO<sub>2</sub> dans un solvant chimique ou physique mais aussi sur un solide ou des membranes. La technique la plus mature est l'absorption sélective post-combustion du CO<sub>2</sub> dans des solvants aminés, les autres gaz présents dans les fumées étant réémis librement dans l'atmosphère. Cette technologie équipe déjà quelques centrales thermiques de taille significative en Amérique du Nord. Le solvant est ensuite chauffé pour désorber le CO<sub>2</sub>. L'opération a un coût énergétique conséquent puisqu'elle nécessite 3-4 GJ/tonne de CO<sub>2</sub> capté. Par ailleurs, une centrale thermique équipée d'une unité de capture de CO<sub>2</sub> perd 10% de son rendement.

Une alternative est d'effectuer la combustion non pas avec de l'air mais avec de l'oxygène pur, de façon à éliminer l'azote et à obtenir des fumées ne contenant plus que du CO<sub>2</sub> et de l'eau alors très facilement séparée par simple condensation. La dépense énergétique du procédé est cette fois liée à la production d'oxygène pur.

D'autres techniques d'avant-garde comme la décarbonation pré-combustion (transformation du combustible fossile en hydrogène par reformage et captage du CO<sub>2</sub> émis) ou même la captation directe du CO<sub>2</sub> dilué dans l'atmosphère (400 ppm) sont aujourd'hui à l'étude.

Quelle que soient les technologies et les configurations de capture leur coût est élevé. Il s'échelonne entre 15€ et 120 €/t<sub>CO2</sub> capté, en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub> de la source ponctuelle. Le prix du carbone ayant stagné ces 15 dernières années entre 5 et 10 €/tonne les technologies de capture n'étaient pas économiques. Toutefois suite à la nouvelle réglementation européenne, les cours ont amorcé depuis fin 2018 une remontée significative (25 €/t<sub>CO2</sub> la tonne) ce qui devrait rendre toutes ces technologies davantage compétitives dans le futur. De telles technologies devraient en toute logique regagner de l'intérêt rapidement.

### ***Injection et stockage***

Une fois capté, le CO<sub>2</sub> peut être injecté dans le sous-sol onshore ou offshore. Différentes formations géologiques peuvent accueillir le CO<sub>2</sub> : aquifères déplétés, formations salines, anciens réservoirs pétroliers déplétés. De façon simpliste, on pourrait dire qu'il s'agit de remplacer les combustibles fossiles qui ont été extraits du sous-sol par le CO<sub>2</sub> émis lors de leur combustion. Un point essentiel du stockage est de s'assurer de l'intégrité des sites et d'en monitorer d'éventuelles fuites notamment au niveau de l'étanchéité de la couverture.

Différents stockages en activité existent dans le monde notamment le site de Sleipner situé au large de la Norvège où près d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> est stocké annuellement depuis 1996.

### ***Utilisation***

Enfin, ces dernières années, la possibilité d'utiliser et de valoriser le CO<sub>2</sub> ont connu une médiatisation importante. Bien que les volumes soient limités (potentiel de l'ordre de 10% des émissions), la valorisation du CO<sub>2</sub> permettrait de développer de nouvelles filières économiques favorisant sa capture. Les utilisations du CO<sub>2</sub> sont multiples :

- ✓ Mettre à profit sans aucune transformation chimique les excellentes propriétés de solvant du CO<sub>2</sub> en conditions supercritiques (73 bars et 31°C). Le CO<sub>2</sub> peut ainsi être utilisé dans l'industrie des boissons carbonatées, pour la récupération assistée d'hydrocarbures, pour l'extraction de composés organiques (caféine, cholestérol...) ou la formulation de composés organiques biocompatibles.
- ✓ Convertir sans aucune transformation chimique le CO<sub>2</sub> en matière organique via la photosynthèse. En l'injectant dans des serres, on accélère la croissance des plantes.
- ✓ Transformer le CO<sub>2</sub> en carbonates en le faisant réagir sur des oxydes naturels ou des sous-produits d'autres industries (par exemple le laitier de haut-fourneau) ceci afin de l'utiliser par exemple dans l'industrie de la construction.
- ✓ Utiliser une source d'énergie bas carbone (électricité renouvelable ou nucléaire) pour synthétiser à partir du CO<sub>2</sub> les matériaux actuellement issus de la pétrochimie : monomères, polymères, engrais, mais aussi carburants. En particulier, du méthane synthétique peut être obtenu en faisant réagir de l'hydrogène produit à partir de l'électrolyse de l'eau avec du CO<sub>2</sub> capté. Selon certains, la « méthanation » ouvrirait la voie à du stockage intersaisonnier de l'énergie.

En conclusion, les techniques de capture, de stockage et de réutilisation du CO<sub>2</sub> sont un atout supplémentaire pour réussir la transition énergétique. Si leur déploiement est conditionné à un contexte économique (prix du CO<sub>2</sub>) il peut aussi fortement dépendre de l'acceptation sociétale des populations.. Elles ne constituent en aucun cas une solution miracle mais pourraient significativement contribuer au respect des objectifs climatiques.

## ANNEXE 8 : RECHERCHE & INNOVATION

La Belgique a été un acteur majeur de la révolution industrielle en Europe aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles notamment grâce à l'expertise mondialement reconnue de ses ingénieurs en sidérurgie, en métaux ferreux et non-ferreux, en chimie et en pétrochimie, dans les sciences nucléaires, les télécommunications et l'aéronautique.

Comme ce fût le cas pour la révolution industrielle, la transition énergétique influencera significativement dans le futur notre vie quotidienne. Elle aura aussi un impact sur la carrière des ingénieurs dont le rôle est entre autres de fournir de l'énergie à la société. De nouvelles évolutions technologiques ont récemment conduit à des avancées spectaculaires : nouveaux matériaux, semi-conducteurs et terres rares, intelligence artificielle, automatique et systèmes de contrôle des réseaux électriques, centrales nucléaires de quatrième génération.

Ces progrès technologiques dépendent en grande partie de l'excellence des ingénieurs qu'ils agissent en recherche fondamentale, en recherche appliquée ou en production. La qualité de leur formation est la clé de voûte de la construction d'un monde meilleur. Pour ce faire la Belgique a besoin d'un enseignement supérieur de haut niveau véhiculé par des professeurs qui excellent non seulement dans leurs spécialités mais aussi de façon transverse. La rigueur, la curiosité, l'acceptation de l'erreur et de l'échec, l'encouragement et la reconnaissance ainsi que le refus de la pensée unique sont autant de valeurs qui doivent caractériser l'ingénieur de demain.

### Liste non exhaustive de sujets de recherche et innovation nécessaires à la réalisation des scénarios présentés dans le présent document

- ✓ technologies CCUS
- ✓ surgénérateurs (U235 ou Th232)
- ✓ co-génération industrielle, urbaine et domestique
- ✓ logiciels et équipements de contrôle/commande des réseaux électriques
- ✓ stockage à grande échelle : power to gas et méthanation
- ✓ matériaux d'isolation thermique à base de déchets plastiques
- ✓ utilisation du bois dans la construction
- ✓ rendement des incinérateurs
- ✓ utilisation des matériaux de base recyclés
- ✓ favoriser les synergies producteurs, utilisateurs et producteurs d'énergie
- ✓ réduire la consommation des véhicules thermique à 2 litres/100km
- ✓ piles à combustibles sans platine
- ✓ véhicule à propulsion électrique et réservoir de gaz (H<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub>)
- ✓ bio-carburants spécifiques à l'aviation
- ✓ économie circulaire
- ✓ renouvelables alternatifs (géothermie, vagues, courants, gradients océaniques)
- ✓ turbines haut rendement
- ✓ réseaux multi-énergie couplant électricité et chaleur
- ✓ micro grilles
- ✓ éducation et formation

**ANNEXE 9 : TABLEAUX RECAPITULATIFS**

Marmotte	Demande en énergie (TWh)					Part (%)	
	2000	2016	2030	2040	2050	2016	2050
<b>Energie primaire</b>	<b>674</b>	<b>655</b>	<b>576</b>	<b>593</b>	<b>610</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	267	263	228	215	199	40%	33%
Gaz	156	166	239	246	256	25%	42%
Charbon	89	35	0	0	0	5%	0%
Nucléaire	146	132	0	0	0	20%	0%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	27	30	33	1%	5%
Biomasse & déchets	12	44	74	94	114	7%	19%
Imports nets électricité	4	6	8	8	8	1%	1%
<b>Génération électrique</b>	<b>83</b>	<b>87</b>	<b>96</b>	<b>103</b>	<b>113</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	1	0	0	0	0	0%	0%
Gaz	16	22	52	53	56	25%	50%
Charbon	16	3	0	0	0	3%	0%
Nucléaire	48	44	0	0	0	50%	0%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	27	30	33	10%	29%
Biomasse & déchets	1	6	12	16	19	7%	17%
Imports nets - pertes	1	3	4	4	4	3%	4%
<b>Energie finale</b>	<b>494</b>	<b>509</b>	<b>509</b>	<b>517</b>	<b>524</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	264	260	228	215	199	51%	38%
Gaz	128	128	150	156	161	25%	31%
Charbon	12	10	0	0	0	2%	0%
Electricité	83	87	96	103	113	17%	21%
Biomasse & déchets	6	24	35	43	52	5%	10%
<b>Transports</b>	<b>95</b>	<b>104</b>	<b>103</b>	<b>100</b>	<b>96</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	94	98	94	88	75	93%	78%
Gaz	0	0	0	1	6	0%	6%
Electricité	1	2	3	6	10	2%	10%
Biomasse & déchets	0	5	5	5	5	5%	5%
Hydrogène	0	0	0	0	0	0%	0%
<b>Habitat</b>	<b>150</b>	<b>148</b>	<b>151</b>	<b>153</b>	<b>155</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	54	37	20	7	0	25%	0%
Gaz	56	62	71	78	79	42%	51%
Charbon	2	1	0	0	0	1%	0%
Electricité	36	41	45	49	53	27%	34%
Biomasse & déchets	2	8	14	18	23	5%	15%
<b>Industrie</b>	<b>167</b>	<b>159</b>	<b>148</b>	<b>147</b>	<b>145</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	46	41	21	16	12	26%	8%
Gaz	62	56	65	62	59	35%	41%
Charbon	8	7	0	0	0	4%	0%
Electricité	46	45	47	48	50	28%	34%
Biomasse & déchets	4	11	16	20	24	7%	16%
<b>Pétrochimie</b>	<b>81</b>	<b>98</b>	<b>107</b>	<b>118</b>	<b>128</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Tortue	Demande en énergie (TWh)					Part (%)	
	2000	2016	2030	2040	2050	2016	2050
<b>Energie primaire</b>	<b>674</b>	<b>655</b>	<b>591</b>	<b>554</b>	<b>551</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	267	263	200	177	156	40%	28%
Gaz	156	166	141	151	146	25%	26%
Charbon	89	35	0	0	0	5%	0%
Nucléaire	146	132	141	94	94	20%	17%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	27	30	34	1%	6%
Biomasse & déchets	12	44	74	94	114	7%	21%
Imports nets électricité	4	6	8	8	8	1%	1%
<b>Génération électrique</b>	<b>83</b>	<b>87</b>	<b>96</b>	<b>104</b>	<b>115</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	1	0	0	0	0	0%	0%
Gaz	16	22	6	22	26	25%	23%
Charbon	16	3	0	0	0	3%	0%
Nucléaire	48	44	47	31	31	50%	27%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	27	30	34	10%	29%
Biomasse & déchets	1	6	12	16	19	7%	17%
Imports nets-pertes	1	3	4	4	4	3%	4%
<b>Energie finale</b>	<b>494</b>	<b>509</b>	<b>462</b>	<b>437</b>	<b>423</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	264	260	200	177	156	51%	37%
Gaz	128	128	131	113	101	25%	24%
Charbon	12	10	0	0	0	2%	0%
Electricité	83	87	96	104	115	17%	27%
Biomasse & déchets	6	24	35	43	52	5%	12%
<b>Transports</b>	<b>95</b>	<b>104</b>	<b>83</b>	<b>71</b>	<b>64</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	94	98	74	57	32	93%	50%
Gaz	0	0	0	2	15	0%	24%
Electricité	1	2	4	6	12	2%	19%
Biomasse & déchets	0	5	5	5	5	5%	8%
Hydrogène	0	0	0	0	0	0%	0%
<b>Habitat</b>	<b>150</b>	<b>148</b>	<b>123</b>	<b>102</b>	<b>87</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	54	37	12	0	0	25%	0%
Gaz	56	62	52	35	11	42%	13%
Charbon	2	1	0	0	0	1%	0%
Electricité	36	41	45	49	53	27%	61%
Biomasse & déchets	2	8	14	18	23	5%	26%
<b>Industrie</b>	<b>167</b>	<b>159</b>	<b>148</b>	<b>146</b>	<b>143</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	46	41	21	16	12	26%	8%
Gaz	62	56	65	62	58	35%	40%
Charbon	8	7	0	0	0	4%	0%
Electricité	46	45	47	48	50	28%	35%
Biomasse & déchets	4	11	16	20	24	7%	17%
<b>Pétrochimie</b>	<b>81</b>	<b>98</b>	<b>107</b>	<b>118</b>	<b>128</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Lièvre	Demande en énergie (TWh)					Part (%)	
	2000	2016	2030	2040	2050	2016	2050
<b>Energie primaire</b>	<b>674</b>	<b>655</b>	<b>570</b>	<b>499</b>	<b>465</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	267	263	182	166	137	40%	29%
Gaz	156	166	142	135	153	25%	33%
Charbon	89	35	0	0	0	5%	0%
Nucléaire	146	132	141	47	0	20%	0%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	24	48	53	1%	11%
Biomasse & déchets	12	44	74	94	114	7%	25%
Imports nets électricité	4	6	8	8	8	1%	2%
<b>Génération électrique</b>	<b>83</b>	<b>87</b>	<b>94</b>	<b>100</b>	<b>109</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	1	0	0	0	0	0%	0%
Gaz	16	22	7	16	33	25%	30%
Charbon	16	3	0	0	0	3%	0%
Nucléaire	48	44	47	15	0	50%	0%
Hydro	0	0	0	0	0	0%	0%
Renouvelables	0	9	24	48	53	10%	48%
Biomasse & déchets	1	6	12	16	19	7%	18%
Imports nets - pertes	1	3	4	4	4	3%	4%
<b>Energie finale</b>	<b>494</b>	<b>509</b>	<b>440</b>	<b>417</b>	<b>395</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	264	260	182	166	137	51%	35%
Gaz	128	128	130	108	97	25%	25%
Charbon	12	10	0	0	0	2%	0%
Electricité	83	87	94	100	109	17%	28%
Biomasse & déchets	6	24	35	43	52	5%	13%
<b>Transports</b>	<b>95</b>	<b>104</b>	<b>75</b>	<b>62</b>	<b>57</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	94	98	66	47	13	93%	23%
Gaz	0	0	1	4	26	0%	45%
Electricité	1	2	4	6	13	2%	22%
Biomasse & déchets	0	5	5	5	5	5%	9%
Hydrogène	0	0	0	0	0	0%	1%
<b>Habitat</b>	<b>150</b>	<b>148</b>	<b>109</b>	<b>90</b>	<b>70</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	54	37	1	0	0	25%	0%
Gaz	56	62	51	27	0	42%	0%
Charbon	2	1	0	0	0	1%	0%
Electricité	36	41	43	45	47	27%	68%
Biomasse & déchets	2	8	14	18	23	5%	32%
<b>Industrie</b>	<b>167</b>	<b>159</b>	<b>148</b>	<b>147</b>	<b>140</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Pétrole	46	41	21	17	12	26%	8%
Gaz	62	56	65	62	55	35%	39%
Charbon	8	7	0	0	0	4%	0%
Electricité	46	45	47	48	50	28%	35%
Biomasse & déchets	4	11	16	20	24	7%	17%
<b>Pétrochimie</b>	<b>81</b>	<b>98</b>	<b>107</b>	<b>118</b>	<b>128</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Gaz à Effet de Serre (Mt <sub>CO2</sub> /an)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Marmotte	121	100	94	88	83
Tortue	121	100	65	53	43
Lièvre	121	100	57	48	40
Intensité énergétique (MWh/k€)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Marmotte	2,61	1,54	1,13	1,04	0,95
Tortue	2,61	1,54	1,16	0,97	0,85
Lièvre	2,61	1,54	1,12	0,87	0,72
Contenu carbone (kg <sub>CO2</sub> /MWh)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Marmotte	188	153	163	149	136
Tortue	188	153	105	98	80
Lièvre	188	153	99	95	86
Emission par habitant (t <sub>CO2</sub> /hab*an)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Marmotte	12,4	8,8	7,9	7,2	6,6
Tortue	12,4	8,8	5,2	4,5	3,5
Lièvre	12,4	8,8	4,8	3,9	3,2
Sobriété énergétique (MWh/hab*an)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Marmotte	66	58	49	49	49
Tortue	66	58	50	46	44
Lièvre	66	58	48	41	37
Démographie (millions habitants)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Trois scénarii	10,3	11,3	11,8	12,2	12,6
Produit Intérieur Brut (milliards €)					
	2000	2016	2030	2040	2050
Trois scénarii	258,2	424,7	507,8	572,2	644,6

Les auteurs, la Plateforme Transition Énergétique FABI et la FABI ne sont pas responsables des erreurs ou omissions éventuelles, ni des conséquences suite à l'utilisation des informations contenues dans ce rapport. En aucun cas, les auteurs ne seront responsables envers qui que ce soit pour toute décision ou action prise sur la base des informations contenues ou pour tout dommage direct ou indirect.

Le contenu est protégé par des droits d'auteur ©. Des extraits de texte ne peuvent être reproduits qu'à des fins non commerciales et pour autant que la source en soit clairement précisée.