

TransAccount

Un modèle comptable pour des scénarios
de développement durable

Décembre 2013

Alain Henry, ah@plan.be
Dimi Jottier, dj@plan.be

Le Bureau fédéral du Plan

Le Bureau fédéral du Plan (BFP) est un organisme d'intérêt public.

Le BFP réalise des études et des prévisions sur des questions de politique économique, sociale, environnementale et leur intégration dans une perspective de développement durable. À cette fin, le BFP rassemble et analyse des données, explore les évolutions plausibles, identifie des alternatives, évalue les conséquences des politiques et formule des propositions.

Son expertise scientifique est mise à la disposition du gouvernement, du parlement, des interlocuteurs sociaux, ainsi que des institutions nationales et internationales. Le BFP assure à ses travaux une large diffusion. Les résultats de ses recherches sont portés à la connaissance de la collectivité et contribuent au débat démocratique.

Le Bureau fédéral du Plan est certifié EMAS et Entreprise Écodynamique (trois étoiles) pour sa gestion environnementale.

url : <http://www.plan.be>

e-mail : sustdev@plan.be

Publications

Publication récurrente :

Rapport fédéral sur le Développement durable

Planning Papers (le dernier numéro) :

113 Visions à long terme - Concepts et application au développement durable
Task force Développement durable - Mai 2013

Working Papers (le dernier numéro) :

13-13 A new version of the HERMES model - HERMES III
Delphine Bassilière, Francis Bossier, Igor Lebrun, Peter Willemé - Novembre 2013

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, moyennant mention de la source.

Éditeur responsable : Henri Bogaert

Dépôt légal : D/2013/7433/33

Deze publicatie bestaat ook in het Nederlands: *TransAccount, Een rekenmodel voor scenario's van duurzame ontwikkeling*

Bureau fédéral du Plan

Avenue des Arts 47-49, 1000 Bruxelles

tél. : +32-2-5077311

fax : +32-2-5077373

e-mail : contact@plan.be<http://www.plan.be>

TransAccount

Un modèle comptable pour des scénarios de développement durable

Décembre 2013

Alain Henry, ah@plan.beDimi Jottier, dj@plan.be

Abstract - Ce working paper décrit TransAccount, un modèle comptable créé au Bureau fédéral du Plan pour construire, selon une approche de backcasting, des scénarios de développement durable, en particulier leur volet climat et énergie. Construire un scénario avec TransAccount consiste notamment à traduire les objectifs à long terme et les hypothèses d'un scénario global de développement durable (par exemple Pyramide ou Mosaïque, scénarios publiés dans le 4ème Rapport fédéral sur le développement durable) en objectifs quantifiés et en hypothèses sur les technologies et les modes de consommation et de production. Les scénarios construits avec TransAccount mettent en évidence les changements de technologies et de modes de consommation et de production nécessaires pour faire face aux défis d'un développement durable.

Abstract - Deze working paper beschrijft *TransAccount*, een rekenmodel om duurzame-ontwikkelingsscenario's op te stellen, in het bijzonder hun onderdeel klimaat en energie. Het model is ontworpen om gebruikt te worden met een backcasting methode. Om een scenario met *TransAccount* op te stellen moeten lange-termijn doelstellingen en hypothesen van een globaal duurzaam-ontwikkelingsscenario (bij voorbeeld, Piramide of Mozaïek, scenario's gepubliceerd in het 4^{de} Federaal Rapport inzake duurzame ontwikkeling) vertaald worden in kwantitatieve doelstellingen en hypothesen over technologie en consumptie – en productiepatronen. De opgestelde scenario's tonen de noodzakelijke veranderingen, in technologie en consumptie – en productiepatronen, die nodig zijn om te voldoen aan de uitdagingen van een duurzame ontwikkeling.

Abstract - This working paper describes *TransAccount*, an accounting model created at the FPB to build sustainable development scenarios, in particular their climate and energy segment, using a backcasting approach. To construct a scenario with *TransAccount*, the long term objectives and hypotheses of a global sustainable development scenario (for example Pyramid or Mosaic, scenarios published in the

Belgian 4th Federal Report on Sustainable Development) have to be translated into quantitative objectives and hypotheses on technologies and on consumption and production patterns. The constructed scenarios highlight the changes needed in technology and in consumption and production patterns to meet the challenges of a sustainable development.

Keywords - développement durable, TransAccount, modèle comptable, scénarios, backcasting, prospective, politique climatique, politique énergétique

Table des matières

Synthèse	1
Synthese	2
Introduction	3
1. Description de <i>TransAccount</i>	5
1.1. Modèle comptable <i>TransAccount</i> , approche de backcasting et objectifs de développement durable	5
1.2. Portée du modèle et classifications utilisées	6
1.3. Volet macroéconomique et croissance	8
1.4. Structure du modèle	9
1.4.1. Structure générale du modèle	9
1.4.2. Industries énergétiques	11
1.4.3. Industries de production et construction	15
1.4.4. Transport	16
1.4.5. Résidentiel	20
1.4.6. Services	24
1.4.7. Agriculture, foresterie et pêche - Activités agricoles	25
1.4.8. Procédés industriels	27
1.4.9. Transport international aérien et maritime	28
1.4.10. Divers	29
2. Utilisation du modèle	30
2.1. Des scénarios de développement durable	30
2.2. Volet macroéconomique des scénarios	31
2.3. Volet sectoriel des scénarios	32
2.3.1. Industries énergétiques	33
2.3.2. Industries de production et construction	34
2.3.3. Transport	36
2.3.4. Résidentiel	38
2.3.5. Services	39
2.3.6. Agriculture, foresterie et pêche - Activités agricoles	39
2.3.7. Procédés industriels	41
2.3.8. Transport international aérien et maritime	42
2.3.9. Divers	43
2.4. Conclusions	45
3. Bibliographie	47

Liste des tableaux

Tableau 1	Classification des activités émettant des GES (common reporting format - CRF)	7
Tableau 2	Hypothèses de rendement et de taux de capture de CO ₂ - centrales gaz et charbon.....	14
Tableau 3	Véhicules, moteurs et source d'énergie.....	20
Tableau 4	Hypothèses de rendement pour la production de chaleur dans les serres	26
Tableau 5	Hypothèses macroéconomiques des scénarios	32
Tableau 6	Hypothèses démographiques des scénarios.....	32
Tableau 7	Principaux résultats - industries énergétiques.....	33
Tableau 8	Principales évolutions - industries énergétiques.....	34
Tableau 9	Émissions de GES du secteur énergie.....	34
Tableau 10	Principales évolutions dans le secteur industries de production et construction	35
Tableau 11	Part des sources d'énergies utilisées dans le secteur industries de production et construction	35
Tableau 12	Émissions de GES du secteur Industries de production et construction	35
Tableau 13	Principales évolutions dans le transport de passagers.....	36
Tableau 14	Principales évolutions pour le transport de marchandises	37
Tableau 15	Émissions de GES du secteur transport.....	37
Tableau 16	Principales évolutions pour le secteur résidentiel.....	38
Tableau 17	Émissions de GES du secteur résidentiel.....	39
Tableau 18	Principales évolutions dans le secteur des services.....	39
Tableau 19	Émissions de GES du secteur des services	39
Tableau 20	Principales évolutions pour le secteur agricole - culture en serre.....	40
Tableau 21	Principales évolutions pour le secteur agricole - culture hors serre.....	40
Tableau 22	Principales évolutions pour les activités agricoles	41
Tableau 23	Émissions de GES du secteur agricole.....	41
Tableau 24	Principales évolutions pour les procédés industriels.....	41
Tableau 25	Émissions de GES du secteur procédés industriels.....	42
Tableau 26	Principales évolutions pour le transport international aérien et maritime	42
Tableau 27	Émissions de GES du transport international aérien et maritime	43
Tableau 28	Principales évolutions pour le secteur "Divers"	43
Tableau 29	Émissions de GES du secteur "Divers".....	43
Tableau 30	Émissions de GES en Belgique - scénario Pyramide ₁₃	45
Tableau 31	Émissions de GES en Belgique - scénario Mosaïque ₁₃	45

Liste des graphiques

Graphique 1	Description du modèle	10
-------------	-----------------------------	----

Synthèse

TransAccount est un modèle comptable conçu pour établir des scénarios de développement durable, en particulier leur volet climat et énergie. Ce modèle est construit pour être utilisé avec une méthode de backcasting. La première étape de cette méthode est de définir une image finale de l'avenir souhaité. Dans l'approche proposée par la TFDD du BFP, cette image finale correspond à un ensemble d'objectifs de développement durable (ODD), basés sur des accords internationaux ou des engagements des pouvoirs publics. Ces ODD s'inscrivent dans la vision à long terme d'un monde en développement durable en 2050. Dans la seconde étape, les changements nécessaires pour réaliser cette image finale, c'est-à-dire cet ensemble d'ODD, sont étudiées.

Les scénarios construits avec cette méthodologie de backcasting ne sont donc pas des prévisions. Ce sont des explorations des changements nécessaires, tant en termes de technologies qu'en termes de modes de consommation et de production, pour atteindre un ensemble d'ODD. D'autres scénarios sont évidemment possibles. Un des enjeux de l'utilisation de *TransAccount* est de contribuer à la discussion sur ces changements. Une première contribution en ce sens a été fournie avec l'utilisation de *TransAccount* pour quantifier les scénarios Pyramide et Mosaïque du 4^{ème} Rapport fédéral sur le développement durable (2007).

Le premier chapitre de ce working paper décrit la structure de ce modèle. *TransAccount* calcule, pour chaque scénario, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES) de toutes les activités présentes sur le territoire belge jusqu'en 2050. Ces activités sont réparties en secteurs, sur la base de la classification utilisée dans les Inventaires nationaux d'émissions de GES. L'évolution de ces activités est compatible avec un scénario macroéconomique de long terme développé par le BFP pour le rapport 2012 du Comité d'études sur le vieillissement (Conseil supérieur de finances, 2012).

Ce chapitre explicite les équations de chaque secteur et décrit les caractéristiques (efficacité énergétique, facteurs d'émissions...) des technologies disponibles dans le modèle. Les consommations d'énergie sont calculées en multipliant le niveau de l'activité d'un secteur par l'intensité énergétique des technologies utilisées. Quant aux émissions, elles sont obtenues en multipliant ces consommations d'énergie par les facteurs d'émissions des sources d'énergie utilisées. Les GES considérés sont ceux repris dans le Protocole de Kyoto, soit le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les gaz fluorés.

Le second chapitre décrit une mise à jour mécanique des scénarios Pyramide et Mosaïque publiés en 2007 (TFDD, 2007). Ces mises à jour ne sont présentées qu'à titre d'illustration. Les résultats publiés dans ce working paper ne doivent donc pas être cités ni utilisés comme référence. Une révision complète de ces scénarios sera publiée dans le prochain Rapport fédéral sur le développement durable.

Dans l'exercice présenté ici, les technologies et les modes de consommation et de production adoptés en 2050 sont choisis de façon à atteindre les ODD, notamment une réduction des émissions de GES de 80% entre 1990 et 2050. *TransAccount* permet ensuite de calculer la trajectoire entre la situation actuelle et 2050.

Synthese

TransAccount is een rekenmodel om duurzame-ontwikkelingsscenario's op te stellen, in het bijzonder voor hun onderdeel klimaat en energie. Het model is ontworpen om gebruikt te worden met een backcasting methode. De eerste stap van die methode is een gewenst toekomstig eindbeeld bepalen. In de benadering van de TFDO van het FPB komt dit eindbeeld overeen met een geheel van doelstellingen van duurzame ontwikkeling (DDO) die gebaseerd zijn op internationale overeenkomsten of verdragen van overheden. Die DDO's passen in de langetermijnvisie van een wereld in duurzame ontwikkeling in 2050. In de tweede stap worden de noodzakelijk veranderingen om het eindbeeld te halen, bestudeerd.

De scenario's opgesteld met een backcasting methode zijn dus geen vooruitzichten. Het zijn verkenningen van noodzakelijke veranderingen, zowel in termen van technologieën als in termen van consumptie- en productiepatronen, om een geheel van DDO's te bereiken. Andere scenario's zijn uiteraard mogelijk. Eén van de doelen van *TransAccount* is bijdragen aan de discussie over die veranderingen. Een eerste bijdrage werd geleverd door *TransAccount* te gebruiken om de scenario's Piramide en Mozaïek, uit het vierde Federaal rapport inzake duurzame ontwikkeling (TFDO, 2007) te kwantificeren.

Het eerste hoofdstuk van deze working paper beschrijft de structuur van het model. *TransAccount* berekent voor elk scenario het energieverbruik en de broeikasgasemissies (bkg-emissies) van alle activiteiten op het Belgisch grondgebied tot 2050. Die activiteiten zijn verdeeld over sectoren op basis van de classificatie uit de Nationale inventaris van broeikasgasemissies. De evolutie van die activiteiten is verenigbaar met een macro-economisch lange-termijn scenario ontwikkeld door het FPB voor het verslag van 2012 van de Studiecommissie voor de vergrijzing (Hoge Raad van Financiën, 2012).

Dat hoofdstuk beschrijft de vergelijkingen van elke sector en geeft ook de kenmerken (energie-efficiëntie, emissiefactoren,...) van de in het model beschikbare technologieën. Het energieverbruik wordt berekend door het activiteitsniveau van een sector te vermenigvuldigen met de energie-intensiteit van de gebruikte technologieën. De bkg-emissies worden verkregen door het energieverbruik te vermenigvuldigen met de emissiefactoren van de gebruikte energiebronnen. De beschouwde bkg's zijn die uit het Kyoto-protocol: koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄), distikstofmonoxide (N₂O) en gefluoreerde gassen.

Het tweede hoofdstuk beschrijft een "mechanische" actualisering van de scenario's Piramide en Mozaïek. Die actualisering wordt slechts weergegeven ter illustratie van *TransAccount*. De hier gepubliceerde resultaten zijn dus niet bedoeld om te citeren of ernaar te verwijzen. In het volgende Federaal Rapport inzake duurzame ontwikkeling zullen de scenario's volledig herzien worden.

In deze working paper worden de technologieën en de consumptie- en productiepatronen van 2050 zo gekozen dat de DDO's bereikt worden, in het bijzonder een vermindering van de bkg-emissies met 80% tussen 1990 en 2050. *TransAccount* maakt het vervolgens mogelijk het pad tussen de huidige situatie en die in 2050 te berekenen.

Introduction

Ce working paper présente le modèle *TransAccount*, un modèle comptable (MC) utilisé pour préparer des scénarios de développement durable, en particulier leur volet climat (émissions de gaz à effet de serre) et énergie. Il montre également quels sont les liens existant entre *TransAccount* et deux autres modèles à long terme du Bureau fédéral du Plan (MALTESE, S3BE) et leurs scénarios.

Une première version de *TransAccount* fut utilisée pour préparer les scénarios Pyramide et Mosaïque du 4^{ème} Rapport fédéral sur le développement durable (TFDD, 2007). Depuis lors, plusieurs évolutions ont eu lieu. Tout d'abord, les données historiques utilisées ont été mises à jour. La dernière année observée est désormais 2011 au lieu de 2005.

Le modèle a ensuite été revu et plusieurs améliorations ont été apportées, en particulier :

- Le secteur agricole a été détaillé pour permettre d'analyser séparément les activités d'élevage et de culture, ce qui permet de mieux prendre en compte les évolutions des modes alimentaires,
- Le calcul de la consommation d'énergie pour la culture sous serre a été revu et simplifié, sur la base de données plus précises provenant des bilans énergétiques régionaux,
- Le calcul des consommations d'énergie dans l'agriculture et des émissions des incinérateurs de déchets ménagers a été revu,
- Le calcul de l'effet du réchauffement global sur la consommation d'énergie résidentielle a été amélioré,
- La possibilité d'utiliser la capture et séquestration du carbone (CCS) dans l'industrie a été ajoutée,
- Les facteurs d'émission de l'industrie ont été calculés avec une meilleure précision.

Des travaux récents ont également été pris en compte pour réviser certaines hypothèses techniques. En particulier, le potentiel de développement des énergies renouvelables en Belgique a été revu à partir des informations rassemblées par l'étude *Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050* (BFP et al., 2012).

Enfin, pour tenir compte des 4^{ème} et 5^{ème} rapports d'évaluation du GIEC (IPCC, 2007 ; IPCC, 2013) et de la Vision à long terme fédérale de développement durable arrêtée par le gouvernement en mai 2013 (Moniteur belge, 2013), l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), qui était de 70% dans la version 2007 des scénarios (TFDD, 2007), est passé à 80% entre 1990 et 2050 pour la version 2013.

Au-delà de cette introduction, ce working paper comporte en deux chapitres. Le premier chapitre présente le modèle, en commençant par le cadre de développement durable dans lequel il a été développé (1.1). Il présente ensuite sa portée géographique et temporelle, puis les classifications (1.2) et le cadre macroéconomique (1.3) utilisés. Finalement, il présente pour chaque secteur considéré dans le modèle les équations qui s'y rapportent, les technologies disponibles et les sources utilisées pour rassembler les données historiques (1.4).

Le second chapitre décrit une mise à jour mécanique des scénarios de développement durable Pyramide et Mosaïque. Ces mises à jour reposent sur les évolutions décrites ci-dessus et sur des hypothèses semblables à celles des scénarios réalisés en 2007 et ne sont présentées qu'à titre d'illustration du fonctionnement de TransAccount. Les résultats publiés dans ce working paper ne doivent donc pas être cités ou utilisés comme référence. Le prochain Rapport fédéral sur le développement durable présentera une révision complète de ces scénarios. Ce chapitre commence par une présentation générale de ces deux scénarios (2.1), puis passe en revue les hypothèses macroéconomiques (2.2) et les choix de modes de consommation et de production faits par secteur dans chaque scénario (2.3). Ce chapitre se termine par une brève conclusion (2.4).

1. Description de *TransAccount*

Ce chapitre décrit le modèle *TransAccount* et la manière de l'utiliser dans un cadre de backcasting (1.1). *TransAccount* calcule pour chaque scénario la consommation d'énergie et les émissions de GES de toutes les activités en Belgique. Ces activités sont réparties en secteurs, sur la base de la classification utilisée dans les Inventaires nationaux d'émissions de GES (1.2). Ce chapitre explique ensuite le cadre macroéconomique dans lequel le modèle est construit (1.3). La dernière section de ce chapitre (1.4) décrit en détail la structure du modèle et les équations utilisées. Ces éléments permettent de comprendre comment ce modèle et son utilisation s'inscrivent dans la démarche prospective de la Task force Développement durable (TFDD) du Bureau fédéral du Plan (BFP).

1.1. Modèle comptable *TransAccount*, approche de backcasting et objectifs de développement durable

TransAccount est un modèle comptable conçu pour établir des scénarios de développement durable, en particulier leur volet climat et énergie. Ce modèle est construit pour être utilisé avec une méthode de backcasting.

Dans une telle méthode, la première étape consiste à définir une image finale du futur souhaité.

Dans cette approche proposée par la TFDD du BFP, cette image finale est celle d'un monde en développement durable en 2050, dans laquelle un ensemble d'objectifs de développement durable (ODD) est atteint. Le 4^{ème} Rapport fédéral sur le développement durable définit un tel ensemble d'ODD, de même que la Vision à long terme (VLT) fédérale de développement durable arrêtée par le gouvernement fédéral (Moniteur belge, 2013).

Dans le cadre de scénarios consacrés à l'énergie et aux émissions de GES, l'ODD portant sur le réchauffement global et le niveau de ces émissions en 2050 qui en découle est particulièrement important. Cet ODD propose de limiter le réchauffement global à 2°C au-dessus des températures préindustrielles. Suivant le 4^{ème} Rapport d'évaluation du GIEC, atteindre un tel objectif n'est possible que si les pays industrialisés réduisent leurs émissions de 80% à 95% entre 1990 et 2050 (IPCC, 2007). Dans les scénarios développés avec *TransAccount*, suivant l'objectif proposé dans la VLT fédérale de développement durable, l'objectif choisi est une réduction de 80% des émissions de GES sur le territoire belge entre 1990 et 2050. Les autres ODD sont également pris en compte, de façon plus qualitative.

La deuxième étape de cette approche de backcasting consiste à décrire un chemin de développement qui montre les évolutions entre la situation actuelle et l'image finale. Dans *TransAccount*, ce chemin de développement est défini à partir des évolutions des niveaux d'activité, des modes de consommation et de production ainsi que des technologies et des sources d'énergie utilisées. Suivant l'approche de backcasting, ces évolutions permettent d'atteindre les ODD en 2050. Les scénarios construits avec cette méthode de backcasting ne sont donc pas des prévisions. Ce sont plutôt des exemples d'évolutions qui permettraient d'atteindre un ensemble d'ODD (Ahlroth and Höjer, 2007). D'autres scénarios sont évidemment possibles.

Lorsque ce chemin de développement est défini, les consommations d'énergie et les émissions de GES sont calculées pour l'ensemble de la période en résolvant les équations du modèle. *TransAccount* est constitué d'un ensemble d'équations, qui sont soit des équations de définition (c'est-à-dire des identités), soit des relations *ad hoc*¹. Ce modèle comptable ne contient aucune équation de comportement estimée économétriquement.

Construire un scénario de développement durable à l'aide de ce modèle revient à explorer les conséquences, en termes de consommation d'énergie et d'émissions de GES, d'évolutions des niveaux d'activité, des modes de consommation et de production ainsi que des technologies et sources d'énergie utilisées. Les scénarios Pyramide et Mosaïque sont des exemples de telles évolutions qui permettent d'atteindre les ODD, en particulier celui directement lié au climat.

1.2. Portée du modèle et classifications utilisées

TransAccount porte sur l'ensemble des activités qui, en Belgique, consomment de l'énergie ou émettent des GES. Les GES considérés sont ceux repris dans le Protocole de Kyoto (UNFCCC, 1997), soit le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les gaz fluorés. La version du modèle présentée ici calcule les consommations d'énergie et les émissions de GES de 2012 jusqu'en 2050.

Le tableau 1 reprend l'ensemble des secteurs et sous-secteurs (appelés secteurs par simplicité) émetteurs de GES, tel que repris dans l'inventaire national d'émissions de GES (Commission nationale climat, 2010). Cet inventaire est constitué par les pouvoirs publics belges (les Régions et l'État fédéral) en vertu des obligations souscrites dans la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCC). Cet inventaire est remis annuellement par la Belgique au secrétariat de la CCC. Il suit la classification du *common reporting format* (CRF).

Les inventaires nationaux d'émissions de GES donnent, pour chaque secteur, leurs consommations d'énergie et leurs émissions de GES. Ces secteurs couvrent l'ensemble des émissions de GES en Belgique. Cependant, un certain nombre d'activités produisant de l'énergie sans émettre de GES ne sont pas reprises dans cette classification et n'apparaissent donc pas dans les inventaires. Il s'agit principalement de la production de chaleur et d'électricité par les énergies nucléaire, éolienne et solaire ou par l'utilisation de biomasse. Afin de pouvoir établir un bilan énergétique belge complet, ces activités sont ajoutées au secteur 1.A.1 (industries énergétiques).

Dans *TransAccount*, l'évolution du PIB est un des facteurs explicatifs de la consommation d'énergie et des émissions de GES des secteurs. Une autre classification utilisée est donc celle qui répartit l'activité économique, mesurée par le PIB, en 5 branches d'activité : l'agriculture (NACE Rév 2 : section A), l'énergie (sections B et D, plus C19), l'industrie (C sauf C19), la construction (section F) et les services (sections E de G à U).

¹ Une relation *ad hoc* (concept utilisé dans le WP6-03 du BFP) n'est ni une identité, ni une équation de comportement estimée économétriquement. Elle calcule une variable endogène à partir d'une ou plusieurs exogènes, suivant une relation supposée par l'auteur. Par exemple, le taux de croissance de la consommation d'énergie d'un secteur est supposé égal au taux de croissance de la valeur ajoutée de ce secteur, ce qui donne une équation *ad hoc* : $E(t) = E(t-1) * VA(t) / VA(t-1)$.

Il n'est pas toujours possible d'établir une correspondance directe entre les secteurs et les branches. Les secteurs sont utilisés pour répartir les émissions de GES et la consommation d'énergie, tandis que les branches sont utilisées pour répartir la production de biens et services. Par exemple, les émissions du transport pour compte propre des entreprises des branches "industrie" et "construction" sont comptabilisées dans le secteur transport et non dans le secteur "industrie de production et construction".

Tableau 1 Classification des activités émettant des GES (common reporting format - CRF)

Code	Secteur	Description
1	Énergie	Ce secteur et ses subdivisions couvrent toutes les émissions de GES liées à la consommation d'énergie
1.A	Utilisations comme combustible	L'ensemble des activités utilisant les sources d'énergie fossile comme combustible
1.A.1	Industries énergétiques	Production d'électricité à partir de combustibles fossiles, raffineries, cokeries
1.A.2	Industries de production et construction	Production des industries manufacturières et de la construction
1.A.3	Transports	Transports (sauf le trafic maritime et aérien international)
1.A.4	Autres secteurs	
1.A.4.a	Tertiaire	Activités de services, bureaux, commerces, entrepôts, etc.
1.A.4.b	Résidentiel	Émissions liées aux consommations d'énergie dans les habitations (chauffage, eau chaude, cuisine)
1.A.4.c	Agriculture, foresterie et pêche	Émissions liées aux consommations d'énergie dans ces secteurs (culture en serres...)
1.A.5	Autres combustions	Émissions liées aux usages militaires
1.B	Émissions fugitives des combustibles	Pertes par évaporation lors du transport et de la distribution du gaz
2	Procédés industriels	Émissions produites par les activités industrielles, en dehors de leur consommation d'énergie (ciment, chaux, sidérurgie, chimie...)
3	Utilisation de solvants et d'autres produits	Émissions liées à l'utilisation de certains produits : solvants, peintures, encres, produits anesthésiques...
4	Activités agricoles	Émissions liées aux activités agricoles, hors consommation d'énergie
5	Changements d'affectation des terres et foresterie	Non repris dans le modèle, qui évalue les émissions brutes, hors absorption par les sols
6	Déchets	Émissions liées à la gestion des déchets solides, à l'épuration des eaux et à l'incinération des déchets
7	Autres	Non utilisé par la Belgique
	Soutes internationales	Hors CRF, mais repris pour mémoire dans les inventaires nationaux
	Aviation	Émissions liées aux carburants livrés pour le transport international maritime et aérien
	Maritime	Émissions liées au carburant fourni aux avions
		Émissions liées au carburant fourni aux navires

Source : Commission nationale climat, 2010

1.3. Volet macroéconomique et croissance

Les approches de backcasting ne prennent en général pas en compte de manière explicite les évolutions macroéconomiques (Ahlroth and Höjer, 2007). En effet, le but d'un scénario de backcasting est plutôt d'illustrer un chemin de développement vers une image du futur souhaitée (Dreborg, 1996).

Or le niveau de croissance économique est une caractéristique essentielle des développements actuel et futur de la société. Dans les scénarios de développement durable de la TFDD, et dans *TransAccount*, la croissance économique est donc prise en compte explicitement.

Le PIB est dès lors une variable exogène importante du modèle *TransAccount*. Le calcul des consommations d'énergie et des émissions de GES est notamment basé sur le niveau d'activité de chaque secteur (voir 1.4.1). Or ces niveaux d'activité sont estimés à partir de l'évolution du PIB (ventilé en 5 branches) entre 2011 et 2050 et d'autres caractéristiques de chaque scénario. La méthodologie utilisée pour cette ventilation du PIB dans les scénarios proposés dans ce working paper est expliquée à la section 2.2.

Le volet macroéconomique des scénarios de développement durable de la TFDD est basé sur les scénarios développés avec les modèles S3BE et MALTESE du BFP, plus particulièrement du scénario de référence proposé dans le rapport du Comité d'Étude pour le vieillissement (Conseil supérieur des finances, 2012). Dans ce scénario, le taux de croissance à long terme du PIB est en moyenne de 1,6% par an entre 2011 et 2050).

Ce scénario de référence ne contient toutefois pas les changements structurels qui seraient nécessaires pour relever les défis sociétaux auxquels il faudra faire face dans les prochaines décennies. En effet, la croissance économique actuelle, liés à des modes de consommation et de production non durables, sont, avec les évolutions démographiques, à l'origine de ces défis sociétaux :

- le coût du vieillissement (pensions, soins de santé, etc.),
- les risques de pauvreté élevés,
- les changements climatiques (réduction des émissions et adaptation),
- les pertes de diversité biologique,
- la demande croissante de ressources alimentaires pour nourrir une population plus nombreuse et plus riche.

Une croissance économique basée sur des modes de consommation et de production durables permettrait à l'avenir d'apporter des solutions à ces défis sociétaux, notamment en générant les moyens financiers pour y faire face. Il serait dès lors possible d'atteindre un ensemble d'objectifs de développement durable (ODD) en 2050.

L'hypothèse faite pour construire les scénarios de développement durable de la TFDD est que la croissance économique du scénario de référence mentionné ci-dessus est compatible avec la réalisation de l'ensemble des ODD si des nouvelles politiques sont adoptées pour changer les modes de consommation et de production. Ces politiques sont incluses dans les scénarios de développement durable.

1.4. Structure du modèle

Cette section explique la structure de *TransAccount* et détaille les équations utilisés pour calculer les émissions de GES et les consommations d'énergie de chaque secteur. Les équations sont construites sur la base de la structure générique décrite au point 1.4.1. La structure du modèle est ensuite détaillée par secteur aux points 1.4.2 à 1.4.10.

Les équations sont d'abord décrites. Elles suivent, avec des adaptations spécifiques à chaque secteur, la méthode générique expliquée au point 1.4.1.

Les technologies modélisées sont ensuite décrites, notamment les hypothèses sur leur performance énergétique et leurs facteurs d'émission. Ces hypothèses proviennent de la littérature scientifique et d'études de sources reconnues (Agence internationale de l'énergie, OCDE, Commission Européenne, Politique scientifique fédérale belge, etc.). Un ensemble de technologies est donc modélisé dans *TransAccount*. Sur cette base, chaque scénario doit spécifier quelles sont celles qui sont effectivement utilisées (voir chapitre 2).

Finalement, pour chaque secteur, les sources utilisées pour rassembler les données historiques sont mentionnées. Lors de la mise à jour des scénarios effectuée en 2013, les données historiques utilisées dans *TransAccount* ont été rassemblées sur la période allant de 1990 – année de référence du Protocole de Kyoto – à l'année la plus récente pour laquelle la plupart des données étaient disponibles à la mi 2013, soit en général 2011.

Dans quelques secteurs, les observations existantes pour certaines variables ne sont pas disponibles jusqu'en 2011. Des estimations ont été réalisées pour ces variables. Dans le cas du parc de logement, par exemple, les données du dernier recensement portent sur l'année 2001. Les équations du modèle ont dès lors été utilisées pour estimer le parc de logements entre 2001 et 2011.

1.4.1. Structure générale du modèle

La structure générale de *TransAccount* est illustrée dans le graphique 1. Pour chacun des secteurs repris dans le tableau 1, ce calcul est divisé en trois étapes.

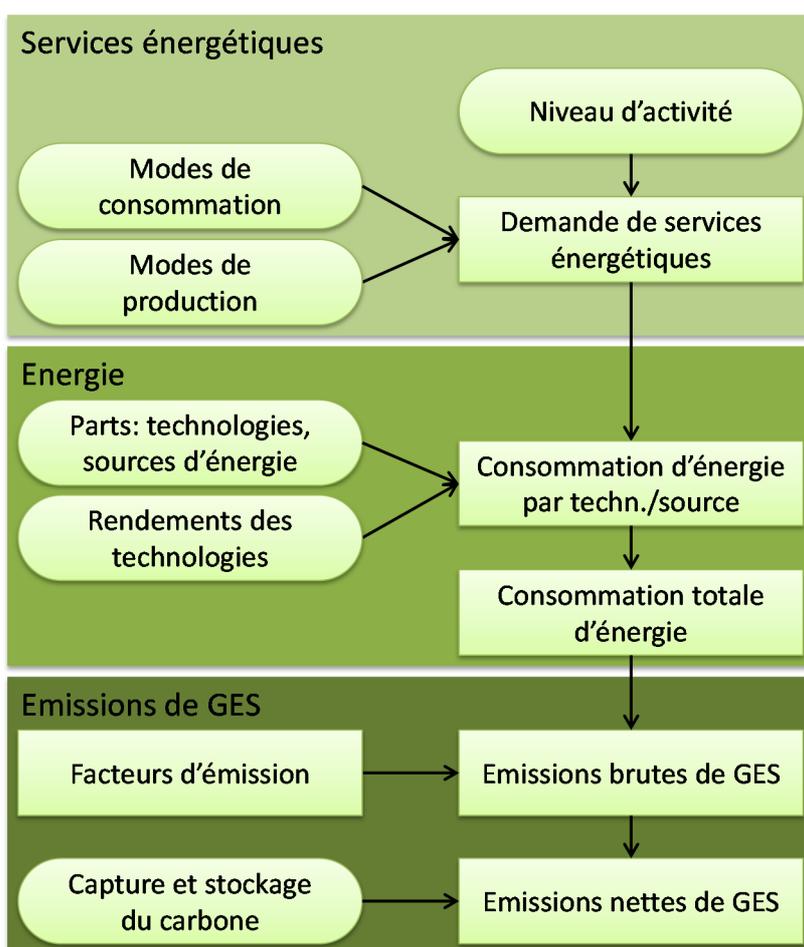
Dans la première étape, illustrée dans la boîte du haut du graphique, la demande de services énergétiques est calculée. Les services énergétiques sont les services que la consommation d'énergie permet d'obtenir, par exemple les kilomètres parcourus dans un véhicule, la température confortable dans un logement ou la haute température qui permet de transformer un minerai en métal. Cette demande de service énergétique dépend des changements proposés dans les modes de consommation et de production, tels que les parts de chaque mode de transport ou les types de matériaux utilisés dans un processus de fabrication. Les modes de consommation et de production incluent notamment la quantité de biens et services consommés ou produits, appelée ici niveau d'activité. Il s'agit par exemple des kilomètres parcourus (consommation de transport) ou des tonnes d'acier ou de ciment fabriquées (production industrielle). Dans *TransAccount*, le niveau d'activité est toutefois indiqué séparément des modes de consommation et de production, car il apparaît explicitement dans les équations.

Dans la deuxième étape, illustrée dans la boîte du milieu du graphique, la consommation d'énergie est calculée. Cette consommation est calculée à partir du niveau de demande de services énergétiques (calculée à la première étape) et des technologies utilisées pour fournir ces services. Pour chaque technologie, la source d'énergie et le rendement doivent être spécifiés (le rendement est la quantité de biens ou de services produites par unité d'énergie consommée).

Dans la troisième étape, illustrée dans la boîte du bas du graphique, les émissions de GES sont calculées. Les émissions brutes sont calculées à partir des consommations de chaque forme d'énergie et des facteurs d'émission (qui donnent la quantité d'émissions produites par unité d'énergie consommée) de chacune de ces sources. Dans certains cas (dans *TransAccount*, il s'agit des secteurs de la production d'électricité et de l'industrie), il est possible de mettre en œuvre la capture et le stockage du carbone dans des couches géologiques. Le dioxyde de carbone capturé est alors soustrait des émissions brutes pour calculer les émissions nettes.

Graphique 1

Description du modèle



Note : Les boîtes rectangulaires correspondent à des calculs effectués dans TransAccount ou à des grandeurs physiques objectives, tandis que les boîtes à côtés arrondis correspondent à des hypothèses ou à des changements de technologies et de comportements.

1.4.2. Industries énergétiques

a. Approche générale

Ce module évalue les consommations d'électricité et d'hydrogène et détermine les moyens mis en œuvre pour les produire (CRF 1.A.1). Il calcule la consommation d'énergie primaire nécessaire pour assurer cette production et les émissions de GES qui y sont associées. En outre, il calcule la consommation d'énergie et les émissions de GES des raffineries et des cokeries.

Consommation d'électricité

La consommation d'électricité est calculée comme la somme des consommations d'électricité ELD des secteurs suivants : industrie de production et construction, transport, résidentiel, services, et agriculture, à laquelle il faut ajouter l'électricité utilisée pour la production d'hydrogène. Le taux de croissance de la consommation d'électricité de ces secteurs est égal à la combinaison de la croissance de l'activité du secteur et de celle des rendements moyens (c'est l'inverse du rendement, soit l'intensité en énergie électrique, qui apparaît dans les équations) des appareils électriques utilisés dans le secteur.

Pour l'industrie de production et construction :

$$ELD_{ind}(t) = ELD_{ind}(t-1) * (1 + r_{gdp_ind}(t)) * (1 + r_{elec_ind}(t)) \quad (1)$$

Où r_{gdp_ind} est le taux de croissance de la production dans l'industrie de production et construction et r_{elec_ind} le taux de croissance de l'intensité en énergie électrique dans l'industrie de production et construction (spécifié dans chaque scénario, voir 2.3.1).

Pour le transport :

$$ELD_{tra}(t) = ELD_{tra}(t-1) * (1 + r_{tra_rail}(t)) * (1 + r_{elec_tra}(t)) \quad (2)$$

Où r_{tra_rail} est le taux de croissance du transport par rail (en véhicule-kilomètre) et r_{elec_tra} le taux de croissance de l'intensité en énergie électrique du transport ferroviaire (voir 2.3.1).

Pour le secteur résidentiel :

$$ELD_{HH}(t) = ELD_{HH}(t-1) * (1 + r_{HH}(t)) * (1 + r_{elec_HH}(t)) + ELD_{BUI}(t) \quad (3)$$

Où r_{HH} est le taux de croissance du nombre de ménages et r_{elec_HH} le taux de croissance de la demande d'électricité par ménage (voir 2.3.1). En outre, ELD_{BUI} est la demande d'électricité pour le chauffage des bâtiments (les pompes à chaleur – voir point 1.4.5).

Pour les services :

$$ELD_{ser}(t) = ELD_{ser}(t-1) * (1 + r_{gdp_ser}(t)) * (1 + r_{elec_ser}(t)) \quad (4)$$

Où r_{gdp_ser} est le taux de croissance de la production dans les services et r_{elec_ser} le taux de croissance de l'intensité en énergie électrique dans les services (voir 2.3.1).

Pour l'agriculture :

$$ELD_{agr}(t) = ELD_{agr}(t-1) * (1 + r_{gdp_agr}(t)) * (1 + r_{elec_agr}(t)) \quad (5)$$

Où r_{gdp_agr} est le taux de croissance de la production de l'agriculture et r_{elec_agr} le taux de croissance de l'intensité en énergie électrique de la production agricole (voir 2.3.1).

La consommation d'électricité inclut également l'électricité utilisée pour la production d'hydrogène par électrolyse. La consommation d'hydrogène étant $D_{H_2}(t)$, dont l'évaluation est décrite ci-dessous, et les importations nettes $D_{H_2_import}(t)$, la consommation électrique nécessaire pour cette production est de :

$$ELD_{H_2}(t) = (D_{H_2}(t) - D_{H_2_IMPORT}(t)) / EFF_{ELECTROLYSIS}(t) \quad (6)$$

La consommation d'électricité est dès lors de :

$$ELD = ELD_{IND} + ELD_{TRA} + ELD_{SER} + ELD_{HH} + ELD_{AGR} + ELD_{H_2} \quad (7)$$

La consommation d'hydrogène est calculée comme la somme des consommations effectuées dans les différents secteurs (industrie de production et construction, transport, résidentiel, services, agriculture). Une partie de l'hydrogène consommée est importée, cette part (en pourcent) est de $TX_{import_H_2}(t)$.

Pour obtenir la demande totale d'électricité, il faut ajouter à ELD l'autoconsommation du secteur électrique (y compris les pertes de transport), la demande d'électricité des centrales de pompage et la demande d'électricité des raffineries et cokeries, qui sont calculées comme suit :

- L'autoconsommation du secteur électrique est supposée égale à 9,59% de la demande ELD , soit la moyenne entre 2000 et 2011 de l'autoconsommation dans la demande finale d'électricité ;
- La demande d'électricité des centrales de pompes est laissée constante à son niveau de 2011 ;
- La demande d'électricité des raffineries et cokeries évolue au même rythme que leur production.

Production d'électricité

La production d'électricité $ELP_i(t)$ pour chaque technologie i est définie de manière exogène. Cette production est calculée à partir du parc de production existant et de l'évolution des technologies et des constructions de centrales supposées dans chaque scénario. La différence entre ELP et ELD est l'importation nette d'électricité. Les émissions de CO₂ dues à la production d'électricité sont calculées à partir des facteurs d'émissions de l'énergie utilisée. Les émissions de CH₄ et N₂O sont supposées augmenter au même rythme que celles de CO₂.

Raffineries et cokeries

Dans ce modèle, la consommation d'énergie (pétrole et gaz) et les émissions de GES des raffineries évoluent au même rythme que la consommation de combustibles fossiles liquides EC_{oil} par les différents secteurs. EC_{oil} est calculé comme la somme des consommations de combustibles liquides des secteurs industrie de production et construction, transport, résidentiel, services, agriculture, procédés industriels et soutes. Le mazout utilisé pour produire l'électricité n'y figure pas, pour simplifier la

structure du modèle et parce que cette quantité est peu élevée (elle ne représente que 2% du total des consommations des autres combustibles liquides mentionnés ici).

$$EC_{ref}(t) = EC_{ref}(t-1) * EC_{oil}(t) / EC_{oil}(t-1) \quad (8)$$

$$E_{ref}(g,t) = E_{ref}(g,t-1) * EC_{oil}(t) / EC_{oil}(t-1) \quad (9)$$

Les émissions de GES des cokeries sont supposées proportionnelles à la production de coke. Cette production évolue à un taux de croissance exogène $r_{coke}(t)$.

$$E_{coke}(g,t) = E_{coke}(g,t-1) * (1 + r_{coke}(t)) \quad (10)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Production d'hydrogène

Pour la production d'hydrogène, seule l'électrolyse est considérée dans ce modèle. Les rendements sont calculés à partir des données de l'IEA (2005 p 44-48). Le rendement en 2050 (70,4%) est calculé comme la moyenne entre le rendement maximum théorique pour de grosses unités de test produisant de l'hydrogène à 400 bars de pression et le rendement maximum actuel dans des unités de test. Le rendement en 2005 est de 50% et évolue avec un taux de croissance constant entre 2005 et 2050.

Consommation d'électricité

Pour la consommation d'électricité, les technologies ne sont pas décrites explicitement. L'évolution des technologies est représentée abstraitement par le taux de croissance de la consommation d'électricité par unité d'activité. Il est supposé, sur la base de WBCSD (2005) et de Boardman et al. (2005), que le progrès technique permet une amélioration des rendements électriques, pour les moteurs et les autres appareils, de 50% entre 2005 et 2050, soit un taux de croissance moyen des rendements de 1,53% par an.

Production d'électricité

Les technologies suivantes sont considérées dans ce modèle pour la production d'électricité.

- Turbines gaz vapeur (TGV – cycle combiné),
- Turbines à gaz (cycle simple),
- Turbines à gaz issu de biomasse (cycle simple),
- Centrale à charbon ultra super critique (USC),
- Centrales nucléaires PWR,
- Éoliennes on-shore et off-shore,
- Panneaux solaires photovoltaïques,
- Géothermie,
- Piles à combustible alimentées à l'hydrogène,
- Cogénération et micro-cogénération,
- Centrales hydroélectriques,

- Centrales de pompage,
- Incinération de déchets avec production d'électricité.

Dans le cas des USC et des TGV, *TransAccount* fait l'hypothèse que ces centrales peuvent être équipées pour la capture et la séquestration du carbone (CCS) à partir de 2020. Le nombre de technologies a été volontairement limité pour garder un modèle simple qui permet toutefois de décrire les tendances à long terme de la production d'électricité. D'autres technologies pourraient être ajoutées (par exemple les centrales à gazéification intégrée de charbon IGCC). En ce qui concerne l'énergie nucléaire, la construction de *TransAccount* a été faite dans le cadre de la loi de sortie du nucléaire de 2003, qui spécifie qu'aucune nouvelle centrale nucléaire ne peut être créée ou mise en exploitation. Il n'était donc pas utile de prévoir d'autres technologies nucléaires que celles actuellement utilisées dans les centrales existant en Belgique.

Le tableau ci-dessous donne les hypothèses de rendement et de taux de capture de CO₂ pour les centrales au gaz et au charbon.

Tableau 2 Hypothèses de rendement et de taux de capture de CO₂ - centrales gaz et charbon

	Rendement sans CCS en 2005 et en 2050	Rendement avec CCS en 2005 et en 2050	Taux de capture du CO ₂
Turbines gaz vapeur	56% - 70%	53%-66%	100%
Turbine à gaz	40% - 44%	-	-
Centrales à charbon USC	30% - 50%	25% - 42%	100%

Source : IEA (2004) pp 56-57

Les turbines à gaz (cycle simple) utilisant du gaz issu de la biomasse ont le même rendement que les turbines à gaz indiquées dans le tableau ci-dessus.

Des hypothèses ont été faites sur le potentiel maximum de certaines formes d'énergie en Belgique en 2050. Elles proviennent de l'étude *Towards 100% renewable energy in Belgium in 2050* (BFP, ICEDD, VITO, 2012).

- Centrales hydroélectriques et de pompage : le potentiel maximum est déjà utilisé en Belgique.
- Éoliennes off-shore : capacité maximum de 8 GW.
- Éoliennes on-shore : une capacité maximum de 9 GW peut être installée.
- Panneaux solaires photovoltaïques: une surface installable de 250 km² (soit environ 50 GW) a été supposée.
- Géothermie : un potentiel de 4 GW est supposé.

c. Sources des données historiques

Les consommations d'énergie, totale et par combustible, ainsi que les émissions de GES sont fournies dans les inventaires nationaux de GES. Les données de production d'électricité viennent d'Eurostat.

1.4.3. Industries de production et construction

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer la consommation d'énergie et les émissions de GES des industries de production et de la construction (CRF 1.A.2). Cette consommation d'énergie n'inclut pas celle d'électricité, qui est traitée avec les autres consommations d'électricité dans le module traitant de la consommation et de la production d'électricité (1.4.2). Les émissions de GES issues des procédés industriels sont traitées au point 1.4.8.

Les activités industrielles sont nombreuses, et chaque industrie utilise des technologies et des procédés qui lui sont propres. Dans le cadre de ce modèle, il n'est pas possible de représenter individuellement chacune de ces industries. L'approche suivie est donc globale. Les consommations d'énergie de ce secteur sont calculées à partir du niveau de production des industries manufacturières et de la construction et de l'efficacité énergétique moyenne du secteur dans son ensemble.

S'agissant de construire des scénarios de développement durable, il ne peut suffire de prendre en compte l'amélioration de l'intensité énergétique des processus de fabrication. Dans ce modèle, l'impact des changements de mode de consommation et de production doit également être pris en compte.

En effet, des changements structurels des modes de consommation et de production vers des biens et services qui consomment moins d'énergie et émettent moins de GES dans tout leur cycle de vie, et en particulier lors de leur production, ne peuvent être modélisés par la seule amélioration de l'intensité énergétique de la production industrielle. Il s'agit par exemple d'une évolution vers des biens plus recyclables, de plus longue durée de vie, réparables ou pour lesquels des mises à jour régulières sont prévues, ou d'un glissement plus important vers les services. Ces évolutions sont représentées de manière abstraite par le taux $r_{cpp}(t)$.

La croissance de la consommation d'énergie dans le secteur industrie de production et construction est calculée sur la base des taux de croissance de l'activité industrielle $r_{gdp_ind}(t)$ et de son intensité énergétique $r_{int}(t)$, ainsi que de l'impact des changements de mode de consommation et de production, représenté par le taux de croissance $r_{cpp}(t)$.

Consommation d'énergie

$$EC(t) = EC(t-1) * (1 + r_{gdp_ind}(t)) * (1 + r_{int}(t) + r_{cpp}(t)) \quad (11)$$

La répartition de la consommation d'énergie entre les différents sources d'énergie (f) se fait sur la base de la part respective de ces sources $sh(f,t)$.

Consommation d'énergie par source

$$EC(f,t) = sh(f,t) * EC(t) \quad (12)$$

Avec

$$\sum_f sh(f,t) = 1$$

Les émissions de CO₂ sont calculées sur la base du contenu en carbone moyen de chaque source d'énergie $CC(f)$, tandis que les émissions de CH₄ et de N₂O sont supposées augmenter au même rythme que celles de CO₂.

Émissions de CO₂

$$E(\text{CO}_2, t) = \sum_f [EC(f, t) * CC(f, t)] \quad (13)$$

Émissions de CH₄ et N₂O

$$E(g, t) = E(g, t-1) * E(\text{CO}_2, t) / E(\text{CO}_2, t-1) \quad (14)$$

Une partie de l'énergie utilisée dans l'industrie est produite dans des centrales à cogénération d'électricité et de chaleur (CHP – combined heat and power). La consommation d'énergie de ce secteur est donc répartie en deux catégories : énergie utilisée avec cogénération et énergie utilisée sans cogénération. Dans *TransAccount*, la production d'électricité produite par la cogénération dans l'industrie est exogène. Les consommations primaires d'énergie et les émissions de GES des centrales à cogénération utilisées dans l'industrie manufacturière sont comptabilisées dans ce secteur et non dans le secteur de l'énergie.

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Il n'y a pas de modélisation individuelle des technologies dans ce module. L'évolution de l'efficacité énergétique globalise les évolutions de toutes les technologies utilisées dans le secteur industrie de production et construction. L'étude VLEEM (Enerdata et al., 2005) a été utilisée pour estimer une valeur plausible de l'amélioration de l'intensité énergétique dans l'industrie.

Il faut noter que, dans ce secteur, les facteurs d'émission varient de façon significative d'une année à l'autre. En effet, ce secteur est composé de nombreuses industries, dont les facteurs d'émission individuels, c'est-à-dire la quantité de GES émises par unité d'énergie utilisée, sont différents. En fonction du niveau d'activité de chaque industrie, pour une année donnée, le facteur d'émission total de l'industrie de production peut donc varier significativement. En projection, les facteurs d'émission ont été gardés à leur niveau de la dernière année observée, soit 2011.

c. Sources des données historiques

Les consommations d'énergie, totale et par combustible, les émissions de GES ainsi que les facteurs d'émission sont fournis dans les inventaires nationaux de GES. La production d'électricité par cogénération vient de la base de données d'Eurostat. Les données sur le niveau d'activité du secteur industrie de production et construction viennent de la base de données HERMES (Bassilière et al., 2013).

1.4.4. Transport

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer la consommation d'énergie et les émissions de GES du secteur transport (CRF 1.A.3).

Ce sont les modes de transports routier, ferroviaire et fluvial qui sont concernés ici. Le transport international maritime et aérien, qui correspond aux soutes dans les bilans d'énergie et les inventaires d'émissions, est traité dans un autre module (point 1.4.9). Les modes non motorisés ne sont pas traités explicitement dans ce modèle, car ils ne consomment pas d'énergie ni n'émettent de GES. Ils sont toutefois pris en compte implicitement, dans la mesure où les études consultées pour construire les évolutions de parts modales dans les scénarios Pyramide et Mosaïque prenaient souvent en compte ces modes non motorisés.

La consommation d'énergie du secteur transport est calculée à partir du nombre de véhicules-kilomètres parcourus par chaque mode de transport multipliés par la consommation d'énergie (sous forme d'essence, de diesel, d'électricité, etc.) nécessaire à ce déplacement d'un kilomètre pour ce mode de transport. Ce calcul se décompose comme suit.

La demande de transport de personnes $TP(t)$ est calculée comme la demande de déplacements par personne $TIP(t)$, mesurée en passagers-kilomètres, multipliée par la population. Cette demande de transport par personne augmente avec le taux de croissance exogène $r_{tip}(t)$.

Pour les marchandises, la demande de transport $TG(t)$ est calculée à partir de l'intensité en transport $TIG(t)$ de la valeur ajoutée $VA(t)$ des branches de l'agriculture, de l'énergie, de l'industrie et de la construction (la branche des services n'est pas prise en compte car elle génère relativement peu de transport de marchandises). Cette intensité en transport est calculée comme le nombre de tonnes-kilomètres nécessaires à la création d'un euro de valeur ajoutée dans ces branches. Elle augmente avec le taux de croissance exogène $r_{tig}(t)$. La demande de transport de marchandises est alors calculée comme cette intensité multipliée par la valeur ajoutée de ces branches.

Demande de transport

$$TIP(t) = TIP(t-1) * (1 + r_{tip}(t)) \quad (15)$$

$$TIG(t) = TIG(t-1) * (1 + r_{tig}(t)) \quad (16)$$

$$TP(t) = TIP(t) * POPULATION(t) \quad (17)$$

$$TG(t) = TIG(t) * VA(t) \quad (18)$$

Cette demande de transport est répartie entre les modes de transport i sur la base des variables exogènes $shp_i(t)$ pour les passagers et $shg_i(t)$ pour les marchandises. En outre, chaque mode de transport est caractérisé par un taux d'occupation $lp_i(t)$ pour les passagers ou par un taux de chargement $lg_i(t)$ pour les marchandises. Pour chaque mode i (les modes de transport sont définis au point b ci-dessous), les véhicules kilomètres, VP_i pour le transport de passagers et VG_i pour le transport de marchandises, sont dès lors calculés avec les équations 19 et 20. Pour simplifier l'écriture, la variable temps t n'est pas indiquée explicitement dans les équations ci-dessous, où seuls les facteurs d'émission $EF(f,g)$ et la fonction $\delta(j,f)$ sont constants dans le temps.

Utilisation des véhicules

$$VP_i = shp_i / lp_i * TP_i \quad (19)$$

$$VG_i = shg_i / lg_i * TG_i \quad (20)$$

La consommation d'énergie est calculée par source d'énergie. La fonction $\delta(j,f)$ vaut 1 si la technologie j utilise la source d'énergie f et zéro dans les autres cas. La consommation d'énergie par kilomètre du mode i utilisant la technologie j est indiquée par ε_{ij} . La part des véhicules du mode i utilisant la technologie j est indiquée par st_{ij} . La consommation de la source d'énergie f est dès lors calculée comme :

$$\begin{aligned} & \textit{Consommation d'énergie par fuel} \\ EC(f) &= \sum_j [\delta(j,f) * \sum_i [\varepsilon_{ij} * st_{ij} * VP_i]] + \sum_j [\delta(j,f) * \sum_i [\varepsilon_{ij} * st_{ij} * VG_i]] \end{aligned} \quad (21)$$

La consommation d'énergie totale dans le secteur transport est la somme des consommations pour chaque source d'énergie.

$$\begin{aligned} & \textit{Consommation d'énergie totale} \\ EC &= \sum_f EC(f) \end{aligned} \quad (22)$$

Les émissions de chaque GES g sont calculées à partir de ces consommations d'énergie et des facteurs d'émission $EF(f,g)$ par unité d'énergie utilisée.

$$\begin{aligned} & \textit{Émissions de GES} \\ E(g) &= \sum_f [EC(f) * EF(f,g)] \end{aligned} \quad (23)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Dans le transport, les technologies correspondent à des combinaisons de types de véhicules (ou modes de transport) et de types de propulsion et de source d'énergie.

Véhicules ou modes de transport

Pour les passagers, les modes de transport considérés sont les automobiles, les bus et autocars, et le train (y compris tram et métro). Pour les marchandises, les modes considérés sont les camions légers (en dessous de 3,5 tonnes), les camions lourds (au-dessus de 3,5 tonnes), le train et la voie d'eau.

Les modes non motorisés (marche à pied et vélo) ne sont pas représentés dans ce modèle, car ils n'utilisent pas de vecteur d'énergie et n'émettent pas de GES.

Moteurs et sources d'énergie

Les types de moteurs considérés dans ce modèle sont :

- les moteurs électriques alimentés par des piles à combustibles utilisant de l'hydrogène,
- les moteurs à combustion interne utilisant des carburants fossiles,
- les moteurs à combustion interne utilisant des agrocarburants,
- les moteurs électriques alimentés directement par le réseau (pour les trains).

Les caractéristiques actuelles (efficacité énergétique, ou quantité d'énergie consommée par km) de ces technologies sont tirées de différentes sources :

- Concawe (2005) et les caractéristiques de véhicules commercialisés en 2013 pour les véhicules utilisant les piles à combustibles,
- Le projet SUSATRANS (De Vlieger et al., 2005) pour les facteurs d'émission et les consommations des véhicules routiers,
- Les consommations des trains et des péniches sont reconstruites à partir des données globales de kilomètres parcourus (base de données transport du BFP) et de consommation du secteur (CNC, 2013 pour la voie d'eau, base de données transport du BFP pour le rail).

Pour l'efficacité des voitures utilisant des piles à combustibles, Concawe (2005) propose une valeur théorique de 0,94 MJ/km à partir de 2010. Les spécifications de deux véhicules actuellement commercialisés avec des piles à combustibles (Mercedes B-class et Hyundai ix35) donnent une valeur d'environ 1,1 MJ/km. Pour tenir compte du fait que ces spécifications sont basées sur des tests et non sur une conduite réelle, où la consommation mesurée est le plus souvent supérieure à celle des tests, une valeur de 1,3 MJ/km a été adoptée pour 2010. Pour le niveau de 2050, IEA (2005), sur base des chiffres du département de l'énergie des États-Unis, propose une valeur de 0,7 MJ/km. Cette valeur a été retenue pour *TransAccount*. Des progrès proportionnels sont supposés pour tous les types de véhicules (voitures, camionnettes, camions, bus...).

Les hypothèses sur l'évolution de l'efficacité énergétique des moteurs à combustion interne sont reprises de Bristow et al. (2004). Ils supposent qu'en 2050, ces moteurs peuvent atteindre des émissions de 71g CO₂ /km (soit 0,98 MJ/km ou environ 3 litres/100km), notamment grâce au progrès technique, à la généralisation de voitures hybrides et à la diminution de la masse et de la cylindrée des voitures. Cette hypothèse est plus forte que la proposition de 4 l/100km du *Global fuel economy initiative* (GFEI, 2009), mais peut être justifiée, par exemple si la masse et la cylindrée des véhicules diminuent plus fortement que ce qui est supposé par le GFEI. Des progrès proportionnels sont supposés pour tous les types de véhicules (voitures, camionnettes, camions, bus...).

Pour les voitures individuelles utilisant des carburants fossiles, des valeurs moyennes entre voitures à essence et voitures diesel, pondérées par les parts respectives de ces deux types, ont été utilisées. Le taux de diésélisation du parc automobile est supposé constant après 2011.

Les facteurs d'émission sont calculés, dans le cas du CO₂, à partir du contenu en carbone des sources d'énergie utilisées, et dans le cas du méthane et du protoxyde d'azote, à partir des émissions reprises dans les inventaires nationaux d'émissions de GES (CNC, 2013).

Synthèse des technologies utilisées

Le tableau 3 indique quelles combinaisons de véhicules et de couples moteur/sources d'énergie sont considérées dans le modèle.

Tableau 3 Véhicules, moteurs et source d'énergie

	Combustion interne, carburants fossiles	Combustion interne, agrocarburants	Électrique, piles à combustible (hydrogène)	Electrique, alimentation directe
Passagers				
Automobiles	X	X	X	
Bus et autocars	X	X	X	
Trains, tram métro				X
Marchandises				
Camions légers	X	X	X	
Camions lourds	X	X	X	
Trains				X
Péniches	X	X	X	

c. Sources des données historiques

Les consommations d'énergie, totales et par source d'énergie, ainsi que les émissions de GES sont fournies dans les inventaires nationaux de GES. Les données spécifiques au secteur transport, principalement le nombre de kilomètres parcourus pour chaque mode de transport, mesurés d'une part en passagers-kilomètres, et d'autre part en tonnes-kilomètres, proviennent de la base de données transport du Bureau fédéral du Plan (2013).

1.4.5. Résidentiel

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer, suivant une approche inspirée de Hens et al. (2001) et De Herde et al. (2000), la consommation d'énergie et les émissions de GES dans le secteur résidentiel (CRF 1.A.4.b). La consommation d'électricité (sauf celle des pompes à chaleur) en est exclue. Celle-ci est traitée avec les autres consommations d'électricité dans le module traitant de la production et de la consommation d'électricité (1.4.2).

La consommation d'énergie du secteur résidentiel inclut principalement le chauffage des logements, qui représente environ 80% de cette consommation (voir ICEDD, 2012), ainsi que la production d'eau chaude sanitaire et la consommation d'énergie pour la cuisine. Dans ce modèle, seuls les besoins en chauffage sont évalués en détails. Il est fait l'hypothèse que la consommation non-électrique d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire et la cuisine évolue comme celle pour le chauffage.

La consommation d'énergie totale est calculée comme la somme des consommations individuelles de chaque catégorie de logement $C(d,k,s)$, multipliées par le nombre de logements de cette catégorie $N(d,k,s)$, où le paramètre d représente le type de logement, k le niveau d'isolation et s le système de

chauffage. Les valeurs que peuvent prendre ces paramètres dans ce modèle sont décrites ci-dessous. Pour simplifier l'écriture, la variable temps t n'est pas indiquée explicitement dans les équations ci-dessous, où seuls le contenu en carbone $CC(f)$ et la fonction $\delta(s,f)$ sont constants dans le temps.

Pour chaque logement, la consommation d'énergie est calculée en fonction de trois paramètres d , k et s . De Herde et al. (2000) fournit une estimation de ces consommations pour un large ensemble de valeurs des paramètres d , k et s .

Consommation d'énergie par logement

$$C = C(d,k,s) \quad (24)$$

À chaque système de chauffage correspond une et une seule source d'énergie f . La fonction $\delta(s,f)$ vaut 1 si le système de chauffage s utilise la source d'énergie f et zéro dans les autres cas.

La consommation d'énergie totale du secteur résidentiel et ses émissions de CO₂ peuvent dès lors être calculée par source d'énergie.

Consommation d'énergie par source d'énergie

$$EC(f) = \text{climate_factor} * \sum_{m,k,s} [N(d,k,s) * C(d,k,s) * \delta(s,f)] \quad (25)$$

Consommation d'énergie totale

$$EC = \sum_f [EC(f)] \quad (26)$$

Émissions de CO₂

$$E = \sum_f [EC(f) * CC(f)] \quad (27)$$

Où $CC(f)$ est le contenu en carbone (en t CO₂ par GJ) de la source d'énergie f .

La variable $\text{climate_factor}(t)$ est introduite pour prendre en compte la diminution de la demande de chauffage suite au réchauffement climatique. L'évaluation de cette variable est expliquée ci-dessous (voir point c).

Dans le secteur résidentiel, les émissions des autres GES sont supposées évoluer proportionnellement à celles de CO₂, qui composent 99% des émissions du secteur.

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Chaque logement possède une série de caractéristiques qui déterminent sa consommation d'énergie moyenne annuelle et la source d'énergie utilisée. Les différentes combinaisons possibles de ces caractéristiques forment l'ensemble des technologies disponibles.

Ces caractéristiques sont :

- Type de logement (maison, appartement... - paramètre d)
- Niveau d'isolation (niveau K - paramètre k)
- Système de chauffage (type de chaudière... - paramètre s)

L'étude de De Herde et al. (2000) est utilisée pour évaluer la consommation d'énergie de chaque catégorie de logements, pour chaque combinaison d'un type de logement, d'un niveau d'isolation et d'un système de chauffage. Dans le cas des réseaux locaux, l'étude de Abu-Sharkh et al. (2006) est utilisée.

Type de logements

Chaque logement est caractérisé par son type : maison individuelle à 2, 3 ou 4 façades, appartement, etc. Dans le cadre de ce modèle, ces types sont regroupés en trois catégories : les maisons à 2 façades (M2), maisons à 4 façades (M4) et les appartements (AP).

Types de logement d : M2, M4, AP

Afin de garder un modèle simple, des éléments comme la surface, le volume ou le nombre de pièces des logements n'interviennent pas.

Niveau d'isolation

Chaque logement est caractérisé par son niveau d'isolation. Dans ce modèle, suivant les normes en vigueur en Belgique au début des années 2000, ce niveau est caractérisé par le paramètre K. Une description de ce paramètre est donnée dans Bureau fédéral du Plan (2006). Dans ce modèle, les niveaux d'isolation considérés vont de K100 (isolation thermique faible) à K20 (isolation élevée).

Niveaux d'isolation des logements k : K20 ... K100

Système de chauffage

Chaque logement est caractérisé par son système de chauffage. À un système de chauffage correspond une et une seule source d'énergie et éventuellement une capacité de production d'électricité s'il y a production de chaleur avec cogénération. Sur la base des simulations effectuées par De Herde et al. (2000), les systèmes de chauffage suivants sont considérés.

Systèmes de chauffage s :

- Chauffage central au mazout (conventionnels et à haut rendement)*
- Chauffage central au gaz (conventionnels et à haut rendement)*
- Chauffage central au bois (pour les maisons seulement)*
- Chauffage central au charbon (pour les maisons seulement)*
- Pompes à chaleur, électricité*
- Chauffage urbain, gaz en cogénération (appartements seulement)*
- Réseaux locaux, gaz avec cogénération*
- Réseaux locaux, hydrogène avec cogénération*

Les rendements des chaudières modernes existant aujourd'hui sur le marché sont déjà très élevés. La marge disponible pour des progrès dans ce domaine est donc très faible. Il est dès lors supposé, dans ce modèle, que le rendement d'un système de chauffage donné est constant dans le temps. Par contre, les rendements peuvent être différents d'un système de chauffage à l'autre (par exemple entre chauffage central au mazout conventionnel et à haut rendement). Le rendement moyen de l'ensemble des systèmes de chauffage existant peut donc évoluer au fur et à mesure que des systèmes à haut rendement remplacent des systèmes à rendement plus faible.

Pour les systèmes de chauffage avec cogénération, outre la consommation d'énergie calculée comme expliqué dans cette section, une capacité de production d'électricité est supposée.

Dans ce modèle, l'utilisation de certains systèmes de chauffage est restreinte à certains types de logements. Cette restriction est indiquée ci-dessus dans la liste des différents systèmes de chauffage considérés dans ce modèle.

Le chauffage électrique classique (convecteurs et chauffage à accumulation fournissant le système principal de chauffage) n'est pas repris dans cette liste. La demande d'électricité provenant de ces systèmes de chauffage est donc traitée avec la demande d'électricité des ménages (point 1.4.2). Toutefois, les chauffages électriques ne représentent que 7% des systèmes de chauffage (recensement de 2001). En pratique, comme en outre ils sont supposés en diminution dans les scénarios de développement durable étudiés avec ce modèle, l'influence de cette particularité peut être considérée comme mineure.

En ce qui concerne la climatisation, celle-ci utilisant l'électricité comme source d'énergie, son cas est traité dans le module qui modélise la consommation et la production d'électricité (1.4.2). En outre, étant donné que ce modèle a été créé pour développer des scénarios de développement durable, il est supposé que l'isolation thermique croissante des bâtiments et l'utilisation de protections solaires passives (volets, végétation, etc.) permet de limiter largement le recours à la climatisation en Belgique.

c. Hypothèse sur l'effet du changement climatique

Le réchauffement global induit une hausse des températures en Belgique. Sur la base de Marbaix et van Ypersele (2004), cette hausse de température entre la période 1999-2003 et l'année 2050 est supposée être de 1°C pour la Belgique. Cette augmentation limitée de 1°C correspond à des scénarios de développement durable où l'ODD de limiter le réchauffement global à 2°C est atteint. La période 1999-2003 est choisie comme référence car elle est centrée sur l'année 2001, dernière année de recensement pour laquelle des données détaillées sur le parc de logement sont disponibles.

Ce réchauffement a un impact sur le nombre de degrés-jours et donc sur la demande de chauffage. Pour évaluer cet effet, une équation linéaire reliant la demande d'énergie des ménages (hors électricité) à la température moyenne annuelle relevée à Uccle entre 1990 et 2011 a été estimée. Sur cette base, un réchauffement de 1°C entre la période 1999-2003 et l'année 2050 correspond à une diminution de la demande d'énergie des ménages de 9,1% entre la période 1999-2003 et 2050.

La consommation d'énergie pour le chauffage est corrigée pour tenir compte de cette évolution attendue du climat, en multipliant la demande d'énergie par le facteur de correction *climate_factor(t)*, qui diminue exponentiellement de 1 à 0,909 entre 2001 et 2050.

d. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie et d'émissions de GES sont tirées des inventaires nationaux d'émissions de GES. Les données de l'enquête socio-économique de 2001 ont été utilisées pour décrire le parc de logement actuel en termes de type de logement et de répartition des systèmes de chauffage. Par contre, pour le niveau d'isolation des bâtiments, il n'existe à notre connaissance pas de base donnée

fournissant cette information. Il est donc supposé que le niveau d'isolation moyen des bâtiments, évalué par de Herde et al. (2000) à K100, était celui de tous les bâtiments en 2001.

1.4.6. Services

a. Approche générale

L'objectif de ce module est d'évaluer les consommations d'énergie et les émissions de GES du secteur des services (CRF 1.A.4.a). La consommation d'électricité en est exclue. Celle-ci est traitée avec les autres consommations d'électricité dans le module traitant de la production et de la consommation d'électricité (1.4.2).

Dans ce modèle, la croissance des consommations d'énergie et des émissions du secteur est calculée à partir de la croissance de la production du secteur $r_{ser}(t)$ et de l'efficacité énergétique du secteur $r_{int}(t)$. La principale demande d'énergie de ce secteur, en dehors de l'électricité, est le chauffage des bâtiments. L'approche adoptée suppose que l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur est égale à celle du secteur résidentiel (voir point 1.4.5).

Consommation d'énergie :

$$EC(t) = EC(t-1) * (1 + r_{ser}(t)) * (1 + r_{int}(t)) \quad (28)$$

Avec

$$r_{int}(t) = (EC_{dwellings}(t) / N_{dwellings}(t)) / (EC_{dwellings}(t-1) / N_{dwellings}(t-1)) - 1 \quad (29)$$

Où $N_{dwellings}$ est le nombre de logements et $EC_{dwellings}$ la consommation d'énergie de l'ensemble des logements.

La répartition de la consommation d'énergie entre les différentes sources d'énergie est faite sur base de la part respective de ces sources $sh(f,t)$.

Consommation d'énergie par source :

$$EC(f,t) = sh(f,t) * EC(t) \quad (30)$$

Avec

$$\sum_f sh(f,t) = 1$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Les technologies utilisées dans ce secteur ne sont représentées que de façon abstraite dans le modèle. C'est la diminution de l'intensité énergétique, qui évolue au même rythme que celle du secteur résidentiel, qui représente l'évolution ces technologies.

c. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie et d'émissions de GES sont tirées des inventaires nationaux d'émissions de GES (CNC, 2013). Les données de production du secteur des services sont reprises de la base de données HERMES (Bassilière et al., 2013).

1.4.7. Agriculture, foresterie et pêche - Activités agricoles

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer les consommations d'énergie et les émissions de GES dans l'agriculture. Ceci inclut, d'une part, les consommations d'énergie du secteur Agriculture, foresterie et pêche et les émissions de GES qui en découlent (CRF 1.A.4.c), et d'autre part, les émissions de GES causées directement par les activités agricoles, principalement l'élevage (fermentation entérique, lisiers) et la gestion des sols (épandages, engrais) (CRF 4). La consommation d'électricité en est exclue. Celle-ci est traitée avec les autres consommations d'électricité dans le module traitant de la production et de la consommation d'électricité (1.4.2).

Les consommations d'énergie du secteur Agriculture, foresterie et pêche sont divisées en deux catégories : celles de la culture en serres et les autres consommations d'énergie. Les émissions de GES des activités agricoles sont divisées en deux catégories : les émissions dues à l'élevage et celles dues à la culture.

Pour l'agriculture en serres, la consommation d'énergie dépend, d'une part, du niveau de cette activité, mesurée par la surface totale des serres, qui évolue avec le taux de croissance $r_{agr_gh}(t)$, et, d'autre part, des technologies utilisées pour chauffer les serres. Chaque technologie est caractérisée par la source d'énergie utilisée, un rendement thermique $\alpha_q(t)$ et un rendement électrique $\alpha_e(t)$. Cette consommation d'énergie est en pratique calculée à partir de la chaleur effectivement produite pour le chauffage des serres (chaleur utile, UH) divisée par le rendement thermique moyen des technologies utilisées.

Consommation d'énergie pour les serres

$$UH_{gh}(t) = UH_{gh}(t-1) * (1 + r_{agr_gh}(t)) \quad (31)$$

$$EC_{gh}(t) = UH_{gh}(t) * \sum_{tech} [sh(tech,t) / \alpha_q(tech,t)] \quad (32)$$

avec $sh(tech,t)$ les parts de chaque technologie à l'année t , la somme de ces parts étant égale à 1.

Chaque technologie utilise une seule source d'énergie. Les émissions de GES de l'agriculture en serres sont dès lors calculées, pour chaque GES, en multipliant les consommations d'énergie par les facteurs d'émission correspondants.

Lorsque la chaleur est produite en cogénération, il y a une production d'électricité égale à :

Production d'électricité pour les serres

$$ELP_{gh}(t) = EC_{gh}(t) * \sum_{tech} [sh(tech,t) * \alpha_e(tech,t)] \quad (33)$$

Pour l'agriculture hors serres, les consommations d'énergie évoluent en fonction, d'une part, de la croissance de cette activité qui, dans ce modèle, évolue au même taux que l'activité agricole dans son ensemble $r_{gdp_agr}(t)$ et, d'autre part, de l'évolution de l'efficacité énergétique de cette activité $r_{ngh}(t)$.

Consommation d'énergie hors serres

$$EC_{ngh}(t) = EC_{ngh}(t-1) * (1 + r_{gdp_agr}(t)) * (1 + r_{ngh}(t)) \quad (34)$$

Les émissions de GES de l'agriculture hors serres sont calculées, pour chaque GES, en additionnant, pour chaque source d'énergie, les consommations d'énergie multipliées par leurs facteurs d'émission respectifs.

Les émissions de GES liées aux activités agricoles sont divisées entre émissions dues à l'élevage (fermentation entérique, lisiers) et celles dues aux autres activités, principalement les cultures (gestion des sols). Les émissions de l'élevage évoluent avec un taux de croissance annuel $r_{meat}(t)$. Les émissions des cultures évoluent en combinant le taux de croissances de l'agriculture $r_{gdp_agr}(t)$ et le taux de croissance des facteurs d'émission de ces activités $r_{aa}(t)$.

Émissions des activités agricoles

$$Elevage : E_{meat}(g,t) = E_{meat}(g,t-1) * (1 + r_{meat}(t)) \quad (35)$$

$$Cultures : E_{cult}(g,t) = E_{cult}(g,t-1) * (1 + r_{gdp_agr}(t)) * (1 + r_{aa}(t)) \quad (36)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Pour l'agriculture en serres, les technologies suivantes sont proposées dans ce modèle :

- la production de chaleur seule à partir de charbon, de mazout, de gaz naturel ou de biomasse,
- la production en cogénération de chaleur et d'électricité à partir de mazout, de gaz naturel, de biomasse ou d'hydrogène.

Chacune de ces technologies est caractérisée par un rendement thermique $\alpha_q(t)$ et un rendement électrique $\alpha_e(t)$, définis de façon exogène. Les parts de chacune de ces technologies peuvent évoluer au cours du temps et doivent être définie dans chaque scénario. Le progrès technologique dans ce secteur est représenté par l'évolution des rendements et la possibilité d'utiliser une technologie actuellement en développement, à savoir la cogénération à partir d'hydrogène.

Les valeurs utilisées sont les suivantes (tableau 4).

Tableau 4 Hypothèses de rendement pour la production de chaleur dans les serres

Mode de production et combustible	Rendement thermique	Rendement électrique
Génération de chaleur seule	$\alpha_q = 0,90$	$\alpha_e = 0,00$
Cogénération à partir de mazout	$\alpha_q = 0,517$	$\alpha_e = 0,394$
Cogénération à partir de gaz	$\alpha_q = 0,517$	$\alpha_e = 0,394$
Cogénération à partir de biomasse	$\alpha_q = 0,517$	$\alpha_e = 0,394$
Cogénération à partir d'hydrogène	$\alpha_q = 0,35$	$\alpha_e = 0,55$

Dans cette version de *TransAccount*, ces rendements sont supposés constants dans le temps.

Dans l'agriculture hors serre, le progrès technologique est représenté par l'évolution de l'efficacité énergétique $r_{ngh}(t)$.

Pour les activités agricoles, le progrès technologique est intégré dans les taux de croissance des facteurs d'émission $r_{meat}(t)$ et $r_{aa}(t)$. Il représente à la fois les améliorations techniques, par exemple dans la gestion des étables ou des sols, et des changements d'activité, par exemple dans la composition du cheptel.

c. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie, d'émissions de GES et de facteurs d'émission de ce secteur sont extraites des inventaires nationaux d'émission de GES. Les données de consommation d'énergie ont été complétées par celles des bilans énergétiques régionaux.

Les données de consommation de protéines animales par personne et par jour viennent du 4^{ème} Rapport fédéral sur le développement durable (page 50).

1.4.8. Procédés industriels

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer les émissions de GES des procédés industriels (CRF 2), à l'exclusion des émissions liées à la consommation d'énergie dans l'industrie, qui sont traitées au point 1.4.3. En effet, les activités des industries émettent des GES non seulement par leur consommation d'énergie, mais aussi, dans un certain nombre de cas, à cause des procédés utilisés. Il s'agit par exemple de la production d'acier, de ciment et d'acide nitrique. Ce module calcule également les émissions de gaz fluorés.

Pour les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O, la croissance des émissions est calculée comme la combinaison des taux de croissance de l'activité industrielle $r_{gdp_ind}(t)$ et des facteurs d'émission $r_{fe}(t)$, ainsi que de l'impact des changements de mode de consommation et de production, représenté par le taux de croissance $r_{cpp}(t)$, identique à celui utilisé dans le module sur la production industrielle.

Émissions de CO₂, CH₄ et N₂O

$$E(g,t) = E(g,t-1) * (1 + r_{gdp_ind}(t)) * (1 + r_{fe}(t)) * (1 + r_{cpp}(t)) \quad (37)$$

En ce qui concerne les gaz fluorés, ce modèle fait l'hypothèse simplificatrice d'un taux constant de réduction de ces émissions, r_f , entre 2011 et 2050.

Émissions de gaz fluorés

$$E(g,t) = E(g,t-1) * (1 + r_f) \quad (38)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Il n'y a pas de description explicite des technologies proposées. Le progrès des technologies est inclus implicitement dans l'évolution des facteurs d'émission $r_{fe}(t)$ et du taux de réduction des émissions de gaz fluorés r_f .

c. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie, d'émissions de GES et de facteurs d'émission de ce secteur sont extraites des inventaires nationaux d'émission de GES (CNC, 2013).

1.4.9. Transport international aérien et maritime

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer la consommation d'énergie et les émissions de GES liés aux routes internationales inventoriées en Belgique (pas de classification CRF). Il s'agit des carburants livrés aux navires et aux avions engagés dans le transport international.

Les émissions de GES de ce secteur ne sont pas incluses dans le total des émissions nationales évaluées dans le cadre du Protocole de Kyoto, mais elles doivent néanmoins être indiquées séparément dans les inventaires d'émission. Les changements climatiques étant une question globale, une réflexion à long terme sur le sujet doit inclure toutes les émissions de GES. Il est donc normal d'inclure les émissions des routes dans ce modèle. Ceci ne préjuge pas de la manière dont ces émissions seront comptabilisées dans de futurs accords internationaux de réductions d'émissions de GES.

Les consommations d'énergie et les émissions de ce secteur sont évaluées à partir de leurs niveaux lors de la dernière année d'observation, en l'occurrence 2011, et d'une estimation de leur taux de croissance entre 2011 et 2050. Le taux de croissance est supposé être le même pour les consommations d'énergie et les émissions de GES, ce qui suppose que le contenu en carbone des carburants utilisés ne varie pas, ni les émissions de méthane et de protoxyde d'azote par unité de carburant utilisé.

Consommation d'énergie

$$EC_{air}(t) = EC_{air}(t-1) * (1 + r_{air}(t)) \quad (39)$$

$$EC_{sea}(t) = EC_{sea}(t-1) * (1 + r_{sea}(t)) \quad (40)$$

Émissions de GES

$$E_{air}(g,t) = E_{air}(g,t-1) * (1 + r_{air}(t)) \quad (41)$$

$$E_{sea}(g,t) = E_{sea}(g,t-1) * (1 + r_{sea}(t)) \quad (42)$$

Les taux de croissance $r_{air}(t)$ et $r_{sea}(t)$ sont calculés comme la combinaison du taux de croissance du trafic et de celui de l'intensité en énergie mesurée en tonne de carburant par tonne-km ou par passager-km.

Taux de croissance

$$r_{air}(t) = (1 + r_{air,trafic}(t)) * (1 + r_{air,int}(t)) - 1 \quad (43)$$

$$r_{sea}(t) = (1 + r_{sea,trafic}(t)) * (1 + r_{sea,int}(t)) - 1 \quad (44)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Les technologies utilisées dans le transport international aérien et maritime ne sont pas décrites explicitement dans ce modèle. Les taux d'évolution des intensités en énergie $r_{air,int}(t)$ et $r_{sea,int}(t)$ regroupent

dans une seule variable les effets de progrès des moteurs, des changements de taux d'occupation et de chargement des véhicules. Ils sont discutés au niveau de chaque scénario.

c. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie, d'émissions de GES et de facteurs d'émission de ce secteur sont extraites des inventaires nationaux d'émission de GES (CNC, 2013).

1.4.10. Divers

a. Approche générale

L'objectif de ce module est de calculer les consommations d'énergie et les émissions de GES de quatre secteurs dont les émissions de GES sont faibles par rapport au total de ces émissions.

- Autres combustions (CRF 1.A.5 - émissions liées aux usages militaires)
- Émissions fugitives des combustibles (CRF 1.B - pertes par évaporation lors du transport et de la distribution du gaz)
- Utilisation de solvants et d'autres produits (CRF 3 - émissions liées à l'utilisation de certains produits : solvants, peintures, encres, produits anesthésiques...)
- Déchets (CRF 6 - émissions liées à la gestion des déchets solides, à l'épuration des eaux et à l'incinération des déchets)

Ces quatre secteurs représentaient ensemble 2% des émissions de GES en Belgique en 2011. La part du plus important d'entre eux, le secteur des déchets, était en 2011 de 1,3%. Étant donné la faible importance de ces secteurs, une approche simplifiée a été adoptée dans *TransAccount*.

Les consommations d'énergie du secteur 1.A.5 sont supposées évoluer à un taux de croissance exogène $r_{mil}(t)$.

$$\begin{aligned} & \text{Consommation d'énergie} \\ EC(t) &= EC(t-1) * (1 + r_{mil}(t)) \end{aligned} \quad (45)$$

Les émissions des GES (pour le gaz g) des secteurs 1.A.5, 1.B, 3 et 6 (indice i) sont supposées évoluer à un taux de croissance exogène $r_i(t)$. Dans le cas du le secteur 1.A.5, ce taux de croissance $r_i(t)$ des émissions de GES est égal à celui de la consommation d'énergie.

$$\begin{aligned} & \text{Émissions de GES} \\ E_i(g,t) &= E_i(g,t-1) * (1 + r_i(t)) \end{aligned} \quad (46)$$

b. Hypothèses sur les technologies utilisées

Dans ce modèle, il n'y a pas d'hypothèse explicite sur les technologies utilisées dans ces secteurs.

c. Sources des données historiques

Les données de consommation d'énergie et d'émissions de ce secteur proviennent directement des inventaires nationaux d'émission (CNC, 2013).

2. Utilisation du modèle

Ce chapitre décrit une mise à jour mécanique des scénarios de développement durable Pyramide et Mosaïque (TFDD, 2007). Ces mises à jour ne sont présentées qu'à titre d'illustration du fonctionnement de *TransAccount*. Le prochain Rapport fédéral sur le développement durable présentera en 2014 une révision complète de ces scénarios. Ce chapitre commence par une présentation générale de ces deux scénarios (2.1), puis passe en revue les hypothèses macroéconomiques (2.2) et les choix de modes de consommation et de production faits par secteur dans chacun d'eux (2.3). Ce chapitre se termine par une brève conclusion (2.4).

2.1. Des scénarios de développement durable

Deux scénarios de développement durable ont été développés par la TFDD : Pyramide et Mosaïque. Dans ces scénarios, construits avec une approche de backcasting, tous les objectifs de développement durable (ODD) sont réalisés en 2050, en particulier celui qui limite le réchauffement global à 2°C au-dessus des températures préindustrielles. Comme expliqué à la section 1.1, cet objectif peut être traduit en un objectif de réduction des émissions de GES en Belgique de 80% entre 1990 et 2050.

Ces scénarios ont initialement été développés en 2007 dans le 4^{ème} Rapport fédéral sur le développement durable. Ce working paper présente une mise à jour mécanique de ces scénarios, réalisée en 2013. Ces scénarios ne sont présentés qu'à titre d'illustration du fonctionnement de *TransAccount*. Les lignes de force des deux scénarios, présentées dans cette section, restent identiques à celles des scénarios de 2007, de même que la plupart des hypothèses présentées dans les sections 2.2 et 2.3. Ils diffèrent cependant des scénarios publiés en 2007 sur plusieurs points :

- les améliorations du modèle, mentionnées dans l'introduction et décrites dans le premier chapitre,
- la mise à jour des données historiques jusqu'en 2011,
- l'utilisation de travaux récents (Conseil supérieur de finances, 2012) pour les projections macroéconomiques et démographiques.

Si l'ensemble des ODD sont atteints dans les deux scénarios Pyramide et Mosaïque, ceux-ci proposent toutefois des images finales différentes. Pyramide imagine un développement durable de type top-down, avec un renforcement du système multilatéral. Mosaïque envisage une réalisation des ODD de type bottom-up, soutenue par le progrès d'instruments nationaux.

La définition d'un développement durable donnée par le Rapport Brundtland (CMED, 1987) inclut "*l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir.*" Ces limitations sont présentes dans Pyramide et Mosaïque, mais avec des pondérations différentes. Dans Pyramide, le développement est surtout marqué par un progrès des connaissances dans les techniques, en particulier celles applicables à une échelle nettement supérieure à celle d'un pays. Dans Mosaïque, le progrès des connaissances est plus largement tourné vers l'organisation sociale, y compris les possibilités de changements de comportements et de modes de vie en société, en particulier à l'échelle nationale ou locale.

En parallèle, Pyramide suppose que la tendance actuelle à l'individualisation se poursuit. Dans Mosaique, cette tendance à l'individualisation est tempérée par une plus grande prise de conscience des individus de leur propre responsabilité dans la société.

Dans les sections suivantes, ces évolutions contrastées dans les deux scénarios sont explicitées et traduites en hypothèses macroéconomiques (2.2) puis en choix de modes de consommation et de production dans les différents secteurs (2.3). Les émissions totales de GES sont présentées dans la conclusion (2.4), qui inclut également une comparaison entre l'approche suivie par la TFDD pour construire ces deux scénarios et celles suivies par d'autres études récentes.

2.2. Volet macroéconomique des scénarios

Cette section décrit les hypothèses faites sur les variables macroéconomiques et démographiques.

La croissance du PIB est supposée identique dans les deux scénarios. Elle est de 1,64% par an (voir 1.3). Cette croissance doit être ventilée entre les 5 branches du PIB considérées dans *TransAccount* (voir 1.2). Une approche qualitative a été suivie. Cette ventilation reflète les caractéristiques et les images finales spécifiques à chaque scénario.

- Pour l'agriculture, la croissance de la production en volume est supposée nulle sur la période considérée dans les deux scénarios. En effet, les surfaces disponibles sont déjà largement utilisées et les rendements particulièrement élevés, ce qui laisse peu de marges de croissance.
- Pour la construction, l'ensemble du parc immobilier doit être rénové en profondeur ou construit à neuf entre aujourd'hui et 2050. Ceci nécessite des investissements au moins deux fois plus élevés que dans les années récentes. Une croissance soutenue de l'activité dans le secteur construction est donc nécessaire. Une croissance de 2% par an est donc supposée dans les deux scénarios.
- Pour l'industrie énergétique (production d'électricité, raffineries et cokeries), la croissance de la production est supposée égale à celle de la demande calculée par le modèle.
- Pour les deux dernières branches, l'industrie manufacturière et les services, les deux scénarios Pyramide et Mosaique proposent deux approches différentes. Le scénario Pyramide correspond à une évolution des modes de consommation et de production relativement proche des tendances actuelles : les consommateurs continuent à changer régulièrement de biens, de durée de vie assez courte, mais produits de façon de plus en plus éco-efficace et recyclés le plus complètement possible. Le scénario Mosaique correspond par contre à des changements plus importants des modes de consommation et de production, avec une tertiarisation plus grande de l'économie. Les biens sont conçus pour avoir une durée de vie longue et être réparables ou réutilisables. Les consommateurs achètent dès lors moins souvent des biens, mais ceux-ci sont de plus grande qualité. Le taux de croissance de la production industrielle est donc plus élevé dans Pyramide que dans Mosaique. Inversement, le taux de croissance des services est plus élevé dans Mosaique que dans Pyramide.

Les valeurs proposées dans le tableau 5 reflètent ces choix de scénario et ventilent la croissance du PIB dans les 5 branches considérées.

Tableau 5 Hypothèses macroéconomiques des scénarios

	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel moyen du PIB (2011-2050)	1,64%	1,64%
Agriculture	0,00%	0,00%
Industries énergétiques	1,16%	0,77%
Industrie manufacturière	1,00%	0,50%
Construction	2,00%	2,00%
Services	1,62%	1,68%

Source : CSF (2012), TFDD

En ce qui concerne la population, le taux de croissance annuel moyen de 0,45% est le même dans les deux scénarios. Cette évolution est celle du scénario de référence du rapport du Comité d'études sur le vieillissement (Conseil supérieur des finances, 2012).

Le nombre moyen de personnes par ménage est cependant différent d'un scénario à l'autre. Dans Pyramide, le nombre de personnes moyen par ménage poursuit la tendance actuelle à diminuer jusqu'en 2030 puis reste stable. Dans Mosaïque, il diminue de la même façon jusqu'en 2030, mais remonte par la suite. Ceci correspond à des changements de mode de vie moins profonds dans Pyramide, où la tendance à l'individualisation observée actuellement continue, que dans Mosaïque, où la tendance à l'individualisation ralentit, voire est inversée.

Tableau 6 Hypothèses démographiques des scénarios

	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel moyen de la population (2011-2050)	0,45%	0,45%
Population (2050)	13,12 millions	13,12 millions
Nombre de personnes par ménage (2011/2030/2050)	2,29 / 2,19 / 2,19	2,29 / 2,19 / 2,40
Nombre de ménages (2050)	5,92 millions	5,40 millions

Source : CSF (2012), TFDD

2.3. Volet sectoriel des scénarios

Cette section présente les choix de modes de consommation et de production faits au niveau de chaque secteur et les principaux résultats qui en découlent.

Deux commentaires généraux peuvent être faits. Tout d'abord, sauf mention contraire ci-dessous, les parts des sources d'énergie dans le total de la consommation d'énergie d'un secteur restent constantes entre 2011 et 2050.

Ensuite, les taux de croissance en projection utilisés dans les scénarios préparés en 2007 ont souvent été repris dans les scénarios présentés dans ce working paper. Ainsi, l'intensité en énergie pour l'agriculture hors serre (voir 2.3.6) diminue de 1,53% par an dans Pyramide. Sur la période de 2005 à 2050 considérée dans les scénarios de 2007, ceci correspond à une diminution totale de 50%. Pour la période 2011-2050 considérée dans les scénarios de 2013, la diminution totale ne sera plus que de 45,2%.

2.3.1. Industries énergétiques

a. Consommation d'électricité et d'hydrogène

En ce qui concerne la consommation finale d'électricité, les rendements des appareils utilisés dans les secteurs industrie de production et construction, transport, résidentiel, services et agriculture, sont supposés s'améliorer de 50% entre 2005 et 2050, soit 1,53% par an (variables r_{elec_ind} , r_{elec_tra} , r_{elec_HH} , r_{elec_ser} et r_{elec_agr}). Cette valeur de 50% est du même ordre de grandeur que les gains en rendement identifiés dans Boardman et al. (2005) pour les gros équipements électroménagers. En outre, IEA (2008) mentionne un potentiel de gain en rendement de 30% à 60% pour ces mêmes équipements. Les équations 1 à 5 décrites au point 1.4.2 permettent alors de calculer la consommation d'électricité de ces secteurs. La consommation finale d'électricité, indiquée au tableau 7, est la somme de ces 5 consommations sectorielles.

En 2050, la consommation d'hydrogène est de 223 PJ dans Pyramide. Elle provient principalement du secteur transport. Dans Mosaïque, elle est de 149 PJ et provient principalement de la production d'électricité et de chaleur en cogénération dans les bâtiments et l'agriculture.

Tableau 7 Principaux résultats - industries énergétiques

2050	Pyramide	Mosaïque
Consommation finale d'électricité	67,6 TWh	61,4 TWh
Consommation d'hydrogène	223 PJ	149 PJ
Électricité utilisée pour la production d'hydrogène	70,4 TWh	58,9 TWh

Source : TFDD

b. Production d'électricité et d'hydrogène

La production d'électricité est égale à la consommation d'électricité, moins les importations nettes. Le tableau 8 donne les évolutions des sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité dans chacun des deux scénarios en 2050, ainsi que le niveau des importations d'électricité. Le cadre législatif de début 2013 est pris en compte. Il s'agit en particulier de la loi sur la sortie du nucléaire de 2003. Il n'y a donc plus de production d'électricité nucléaire en 2050.

Le tableau 8 résume également les choix faits sur la capture et la séquestration du CO₂ (CCS, carbon capture and storage) dans chaque scénario. La production d'électricité, plus élevée dans Pyramide que dans Mosaïque, est notamment assurée par une utilisation accrue de centrales au gaz, dont les émissions sont en grande majorité capturée et séquestrée. L'utilisation du CCS est donc plus importante dans Pyramide que dans Mosaïque sur l'ensemble de la période. Toutefois, en fin de période, dans Pyramide, le développement de l'éolien, plus rapide que dans Mosaïque, et la production d'électricité par géothermie (29,8 TWh en 2050), permettent de fermer la plus grande partie des centrales électriques utilisant des combustibles fossiles. Le CCS n'est dès lors plus utilisé dans Pyramide en 2050.

Des contraintes telles que la capacité du réseau électrique pour exporter ou importer de l'électricité, le taux de croissance annuel des capacités de production d'énergie renouvelable ou encore la présence nécessaire d'unités de production de pointe sont prises en compte lors du calcul de la production d'électricité dans chaque scénario.

Tableau 8 Principales évolutions - industries énergétiques

2050	Pyramide	Mosaïque
Production totale d'électricité	152,5 TWh	131,1 TWh
- Eolien	46,5 TWh	35,4 TWh
- Solaire photovoltaïque	42,5 TWh	42,5 TWh
- Géothermie	29,8 TWh	0,0 TWh
- Cogénération (gaz et hydrogène)	27,3 TWh	39,3 TWh
- Autres centrales thermiques (gaz, charbon et biomasse)	4,7 TWh	12,3 TWh
- Autres	1,6 TWh	1,6 TWh
Importations nettes d'électricité	-10,4 TWh	-7,3 TWh
CO ₂ séquestré sur la période 2020-2050	320 Mt	152 Mt
CO ₂ séquestré en 2050	0,0 Mt	3,1 Mt
Électricité utilisée pour la production d'hydrogène	70,4 TWh	58,9 TWh
Importations nettes d'hydrogène	44,6 PJ	0,0 PJ

Source : TFDD

Dans les deux scénarios, l'hydrogène est produit par électrolyse (voir point 1.4.2.b), principalement à partir d'électricité éolienne et solaire. L'équation 6 permet de calculer la consommation d'électricité correspondante. Comme dans le cas de la production d'électricité, la production d'hydrogène est calculée pour être égale à la consommation (moins les importations nettes éventuelles).

Le tableau 8 montre également le niveau des importations d'hydrogène. Il n'y a pas d'importation d'hydrogène dans Mosaïque, tandis que dans Pyramide il est supposé que 20% de la consommation d'hydrogène est importée.

Les émissions de GES du secteur énergie, calculées comme décrit au point 1.4.2, sont reprises dans le tableau 9.

Tableau 9 Émissions de GES du secteur énergie
Mt CO₂ ég.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur énergie	22,1	2,8	2,8

Source : TFDD

2.3.2. Industries de production et construction

Les principales évolutions entre 2011 et 2050 dans le secteur industries de production et construction sont reprises dans le tableau 10. Ce tableau donne, selon la variable, soit le taux de croissance annuel moyen sur la période 2011-2050, soit le niveau atteint en 2050. Ces valeurs sont cohérentes avec celles faites dans le secteur des procédés (section 2.3.7).

Le taux de croissance annuel de l'activité est calculé à partir de la croissance du PIB comme expliqué à la section 2.2. Pour l'industrie, il s'élève à 1% dans Pyramide et 0,5% dans Mosaïque. Pour la construction, il est de 2% dans les deux scénarios.

Les évolutions de l'intensité énergétique sont différentes dans chaque scénario. Cette intensité diminue de 2,8% par an dans Pyramide et de 2,4% dans Mosaïque. Cette diminution est due au progrès technique et au changement des modes de consommation et de production (voir section 2.1).

Une partie du CO₂ émis par l'industrie est capturé puis séquestré. Dans les deux scénarios, la capture de carbone augmente linéairement de 2020 à 2050, pour arriver à 2 Mt CO₂.

Tableau 10 Principales évolutions dans le secteur industries de production et construction

2011-2050	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance de la production industrielle	1,0%	0,5%
Taux de croissance de la production dans la construction	2,0%	2,0%
Intensité énergétique - taux de croissance annuel moyen	-2,8%	-2,4%
Impact du progrès technique	-2,8%	-0,9%
Impact des changements des modes de consommation et de production	-0,0%	-1,5%
CO ₂ capturé et séquestré en 2050 dans l'industrie	2,0 Mt	2,0 Mt
Production d'électricité en cogénération à partir de 2030	15,8 TWh	13,2 TWh

Source : TFDD

Une partie de la chaleur utilisée dans l'industrie est produite en cogénération avec de l'électricité. En supposant que le taux de croissance de cette production d'électricité est celui du scénario REF_30/20_flex des *Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030* (Bureau fédéral du Plan, 2011), ajusté pour tenir compte du différentiel de croissance de la production industrielle entre les scénarios, l'électricité produite en 2030 par le secteur industriel dans des installations de cogénération est de 15,8 TWh dans Pyramide et de 13,2 TWh dans Mosaïque. Le niveau atteint en 2030 est supposé rester stable jusqu'en 2050.

Le tableau 11 donne la répartition des différentes sources d'énergie utilisées dans ce secteur, pour l'année 2050. En dehors de l'énergie utilisée en cogénération, les parts de chaque source d'énergie sont supposées rester égales aux parts de la dernière année d'observation, soit 2011, et ce pour les deux scénarios. La catégorie "autres combustibles" inclut par exemple les déchets brûlés dans les fours à ciment. Les sources d'énergie utilisées dans les installations de cogénération sont par contre différentes d'un scénario à l'autre.

Tableau 11 Part des sources d'énergies utilisées dans le secteur industries de production et construction

	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Combustibles solides	30,6%	30,6%
Combustibles liquides	11,4%	11,4%
Gaz	25,9%	25,9%
Biomasse	3,3%	3,3%
Autres combustibles	28,7%	28,7%
Part de la biomasse dans la cogénération	50%	40%
Part de l'hydrogène dans la cogénération	50%	60%

Source : TFDD

Les émissions de GES du secteur industries de production et construction, calculées comme décrit au point 1.4.3, sont reprises dans le tableau 12.

Tableau 12 Émissions de GES du secteur Industries de production et construction
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur industries de production et construction	23,6	2,0	3,0

Source : TFDD

2.3.3. Transport

Dans ce secteur, une partie importante des données n'était pas disponible pour 2011 lorsque ces scénarios ont été préparés. C'est donc l'année 2010 qui sert de point de référence pour ce secteur.

Les principales évolutions des variables exogènes du secteur du transport sont reprises dans le tableau 13 pour le transport de passagers et dans le tableau 14 pour le transport de marchandises. Ces tableaux donnent, selon la variable, soit le taux de croissance sur la période 2010-2050, soit le niveau atteint en 2050.

Les deux premières lignes du tableau 13 donnent la demande de déplacement par personne en 2050, ainsi que sur la croissance des taux d'occupation des véhicules. En 2050, les déplacements, tous modes confondus, sont plus nombreux dans Pyramide que dans Mosaïque. Avec une même croissance de la population dans les deux scénarios (voir tableau 6), la demande totale de déplacements est donc plus élevée dans Pyramide (+ 50% entre 2010 et 2050) que dans Mosaïque (0%). Les taux d'occupation augmentent plus lentement dans Pyramide (+15% entre 2010 et 2050) que dans Mosaïque (+25%).

Les parts modales des transports collectifs augmentent dans les deux scénarios. Cette tendance est plus marquée dans Mosaïque que dans Pyramide. Entre 2010 et 2050, ces parts modales évoluent de façon linéaire.

Tableau 13 Principales évolutions dans le transport de passagers

	Pyramide	Mosaïque
Nombre de passagers-kilomètres par personne (2050)	15 279 km/pers.	10 486 km/pers.
Évolution du taux d'occupation des véhicules (total 2011-2050)	+15%	+25%
Parts modales (2050) : voitures / bus / trains	60% / 30% / 10%	40% / 45% / 15%
Sources d'énergie utilisées (2050) -Parts hydrogène / fossiles / agrocarburants		
Voitures	90% / 0% / 10%	10% / 80% / 10%
Bus et autocars	100% / 0% / 0%	100% / 0% / 0%
Part du diesel dans les voitures à moteur à combustion interne (sur la base du kilométrage total)	65,7%	65,7%
Amélioration annuelle de la consommation par km (2010-2050) :		
- Moteurs à combustion interne, carburants fossiles (TJ/km)	-2,17%	-2,17%
- Moteurs à combustion interne, biocarburants (TJ/km)	-2,17%	-2,17%
- Moteurs électriques et piles à combustible, hydrogène (TJ/km)	-1,66%	-1,66%
- Moteurs électriques, chemin de fer (GWh/km)	-1,53%	-1,53%

Source : TFDD

En termes de sources d'énergie et de technologies, les véhicules électriques (avec une pile à combustible utilisant de l'hydrogène) sont prépondérants dans Pyramide, tandis que les véhicules à moteur à combustion interne continuent à être utilisés dans Mosaïque. Le tableau précise finalement l'évolution du taux de dieselisation des voitures utilisant des carburants fossiles et l'évolution des consommations d'énergie par kilomètre. Les consommations d'énergie par kilomètre sont calculées à partir de Bristow et al. (2004) et Concawe et al. (2005).

La première ligne du tableau 14 donne l'intensité en transport de marchandises du PIB (hors branche des services) en 2050. La branche des services n'est pas prise en compte ici, car ces activités génèrent

relativement peu de transport de marchandises. Dans le scénario Pyramide, en 2050, les modes de production font une plus grande utilisation du transport que dans Mosaïque. Les taux de chargement des véhicules évoluent parallèlement à celui du taux d'occupation dans le transport de passagers.

Les parts modales des transports ferroviaire et fluvial augmentent dans les deux scénarios. Cette tendance est plus marquée dans Mosaïque que dans Pyramide. Entre 2010 et 2050, ces parts modales évoluent de façon linéaire.

Tableau 14 Principales évolutions pour le transport de marchandises

	Pyramide	Mosaïque
Intensité en transport du PIB (hors service) (tonne-kilomètre par euro chaînes année de référence 2005) (2050)	0,745	0,634
Évolution du taux d'occupation des véhicules (total 2010-2050)	+15%	+25%
Parts modales (2050) : camionnettes / camions / trains / fluvial	3% / 57% / 20% / 20%	3% / 47% / 25% / 25%
Sources d'énergie utilisées (2050) - Parts hydrogène / fossiles / agrocarburants		
Camionnettes	90% / 0% / 10%	10% / 80% / 10%
Camions	90% / 0% / 10%	90% / 0% / 10%
Amélioration annuelle de la consommation par km (2010-2050) :		
- Moteurs à combustion interne, carburants fossiles (TJ/km)	-2,17%	-2,17%
- Moteurs à combustion interne, biocarburants (TJ/km)	-2,17%	-2,17%
- Moteurs électriques et piles à combustible, hydrogène (TJ/km)	-1,66%	-1,66%
- Moteurs électriques, chemin de fer (GWh/km)	-1,53%	-1,53%
- Transport fluvial, tous carburants (TJ/km)	-1,19%	-1,19%

Source : TFDD

En termes de sources d'énergie et de technologies, les véhicules électriques (avec une pile à combustible utilisant de l'hydrogène) sont prépondérants dans les deux scénarios, sauf pour les camionnettes dans Mosaïque. Le transport ferroviaire est totalement électrifié dans les deux scénarios en 2050. De même, dans les deux scénarios, en 2050, le transport fluvial fait uniquement appel à des moteurs électriques et des piles à combustible. Le tableau précise finalement l'évolution des consommations d'énergie par kilomètre. Ces consommations d'énergie par kilomètre dans le transport de marchandises évoluent avec les mêmes taux de croissance que celles du transport de personnes.

Les émissions de GES du secteur transport, calculées comme décrit au point 1.4.4, sont reprises dans le tableau 15. Dans Pyramide, le secteur transport n'utilise presque plus de carburants fossiles. Les émissions liées à l'utilisation de l'hydrogène et des biocarburants étant nulles par hypothèse, les émissions de GES du transport dans Pyramide sont donc réduites à quasiment zéro.

Tableau 15 Émissions de GES du secteur transport
Mt CO₂ ég.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur transport	27,7	0	1,5

Source : TFDD

2.3.4. Résidentiel

Les principales évolutions des variables exogènes du secteur résidentiel sont reprises dans le tableau 16. Ce tableau donne pour chaque variable, soit le niveau atteint en 2050, soit le taux de croissance annuel moyen sur la période 2011-2050.

Dans *TransAccount*, le nombre de logements évolue avec le même taux de croissance que le nombre de ménages. Le nombre de ménages est calculé à partir des données exogènes de population et de taille des ménages (voir section 2.2). Dans *Pyramide*, le nombre de logements augmente donc de 25% entre 2011 et 2050. Dans *Mosaïque*, le nombre de logements augmente de 14%.

Pour le secteur résidentiel, les données recueillies lors du dernier recensement effectué en 2001 étaient particulièrement détaillées. Les données recueillies après 2001 ne donnent plus autant de détails. La scénarisation utilisée pour le secteur résidentiel commence donc dès 2001 et estime les données de la période 2002-2011 sur la base des équations expliquées au point 1.4.5.

En 2001, les logements étaient répartis de la façon suivante : 42% de maisons 4 façades, 34% pour les maisons 2 façades et 24% pour les appartements. Le tableau 16 donne les répartitions des logements adoptés en 2050. Entre 2001 et 2050, ces parts sont supposées évoluer de façon linéaire.

Dans les deux scénarios, la moitié des bâtiments existant en 2050 ont été construits entre 2001 et 2050 avec des performances énergétiques élevées (norme K20). L'autre moitié des bâtiments a subi une rénovation profonde et atteint une norme K30. Cette évolution demande un effort d'investissement particulièrement important dans le secteur du bâtiment. Pour atteindre cet objectif sur l'état du parc de bâtiments, les rénovations et les constructions neuves devront être au moins deux fois plus nombreuses au cours des 40 prochaines années qu'actuellement.

Tableau 16 Principales évolutions pour le secteur résidentiel

	Pyramide	Mosaïque
Croissance du nombre de logements - 2011 - 2050	25%	14%
Logements en 2050 : Maisons 4 façades / 2 façades / appartements	35% / 35% / 30%	35% / 35% / 30%
Parts des logements rénovés / neufs en 2050	50% / 50%	50% / 50%
Niveau d'isolation des logements rénovés / neufs	K30 / K20	K30 / K20
Répartition des systèmes de chauffage en 2050		
Pompes à chaleur	25%	25%
Réseaux locaux - gaz	0%	15%
Réseaux locaux - hydrogène	10%	15%
Chauffage urbain (appartements)	9%	9%
Bois (maisons)	11%	11%
Chaudières au gaz	45%	20%
Chaudières au mazout	0%	5%

Source : TFDD

Le tableau 16 donne également la répartition des différents types de chauffage utilisé en 2050 dans les deux scénarios. Ces parts évoluent linéairement entre 2001 et 2050, sauf dans le cas du chauffage urbain et des réseaux locaux, qui ne commencent à être utilisés qu'après 2020, puis augmentent également de façon linéaire.

Les émissions de GES du secteur résidentiel, calculées comme décrit au point 1.4.5, sont reprises dans le tableau 17.

Tableau 17 Émissions de GES du secteur résidentiel
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur résidentiel	17,1	4,8	6,7

Source : TFDD

2.3.5. Services

Les principales évolutions entre 2011 et 2050 dans le secteur des services sont reprises dans le tableau 18. Le taux de croissance annuel de l'activité est calculé à partir de la croissance du PIB comme expliqué à la section 2.2. Il s'élève à 1,62% dans Pyramide et 1,68% dans Mosaïque. Comme indiqué au point 1.4.4, les gains en efficacité énergétique dans ce secteur, indiqués au tableau 18, sont les mêmes que ceux dans le secteur résidentiel, car la consommation d'énergie du secteur (hors électricité) est principalement liée à la gestion des bâtiments. Les parts des différentes sources d'énergie utilisées dans les services restent constantes entre 2011 et 2050, et sont également indiquées au tableau 18.

Les émissions de GES du secteur des services, calculées comme décrit au point 1.4.6, sont reprises dans le tableau 19.

Tableau 18 Principales évolutions dans le secteur des services

	2011-2050	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel de la production dans les services		1,62%	1,68%
Taux de croissance annuel de l'efficacité énergétique dans les services		2,3%	1,5%
Part des sources d'énergie			
Combustibles solides		0%	0%
Combustibles liquides		24,6%	24,6%
Gaz		73,3%	73,3%
Biomasse		0,8%	0,8%
Autres combustibles		1,3%	1,3%

Source : TFDD

Tableau 19 Émissions de GES du secteur des services
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur des services	5,2	4,1	5,6

Source : TFDD

2.3.6. Agriculture, foresterie et pêche - Activités agricoles

Le taux de croissance de la production agricole, mesurée par sa contribution au PIB, a été calculé à la section 2.2. Dans les deux scénarios, il est supposé que la production agricole reste stable, en volume, entre 2011 et 2050.

La consommation d'énergie du secteur agricole, de même que les émissions de GES liées à l'utilisation d'énergie, sont calculées séparément pour la culture en serre et le reste de l'agriculture. Les émissions liées aux activités agricoles sont également calculées séparément.

Les principales évolutions de la culture en serres, qui représente environ 60% de la consommation d'énergie du secteur agricole, sont reprises au tableau 20. En 2011, le chauffage des serres utilisait principalement du gaz (92%) et de la biomasse (7%) (Aernouts et Jaspers, 2012). En outre, les serres étaient à plus de 50% chauffées par des installations de cogénération (Jaspers et al., 2012).

Dans les deux scénarios, la surface de serres utilisées en Belgique reste constante entre 2011 et 2050. En 2050, dans les deux scénarios également, toutes les serres sont chauffées avec des installations de cogénération. La source d'énergie utilisée est uniquement l'hydrogène dans Pyramide, tandis que dans Mosaïque l'hydrogène compte pour 80% et les biocarburants pour 20%.

Les principales évolutions de l'agriculture hors serres sont reprises au tableau 21. L'intensité énergétique dans ce secteur diminue de 1,53% par an dans Pyramide, tandis qu'elle reste stable dans Mosaïque. Les sources d'énergie utilisées sont le diesel et les biocarburants dans les deux scénarios, mais dans des proportions un peu différentes.

Pour les émissions des procédés agricoles, les principales évolutions sont indiquées au tableau 22. Dans les deux scénarios, des changements importants de modes de consommation alimentaire sont supposés (TFDD, 2007). Ainsi, la consommation de viande diminue dans les deux scénarios (passant de 160 g / personne / jour en 2004 à 50 g en 2050 dans Pyramide et 75 g dans Mosaïque – TFDD, 2007, page 50). Dans la culture (l'ensemble du secteur agricole hors élevage), la production est supposée rester stable. Les facteurs d'émission diminuent eux de 1,53% par an dans les deux scénarios.

Tableau 20 Principales évolutions pour le secteur agricole - culture en serre

	Pyramide	Mosaïque
Chauffage des serres		
Croissance de la surface des serres - 2011-2050	0%	0%
Part du chauffage des serres réalisées avec cogénération en 2050	100%	100%
Part des sources d'énergie en 2050		
Diesel	0%	0%
Gaz	0%	0%
Biocarburants	0%	20%
Hydrogène	100%	80%

Source : TFDD

Tableau 21 Principales évolutions pour le secteur agricole - culture hors serre

	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel de l'intensité énergétique	-1,53%	0%
Part des sources d'énergie en 2050		
Charbon	0%	0%
Diesel	20%	40%
Gaz	0%	0%
Biocarburants	80%	60%

Source : TFDD

Tableau 22 Principales évolutions pour les activités agricoles

	Pyramide	Mosaïque
Consommation de viande en 2050	50 g / pers / jour	75 g / pers / jour
Facteur d'émission dans les cultures (taux de croissance annuelle 2011-2050)	-1,53%	-1,53%

Source : TFDD

Les émissions totales (énergie et activités) de GES du secteur agricole, calculées comme décrit au point 1.4.7, sont reprises dans le tableau 23.

Tableau 23 Émissions de GES du secteur agricole
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur agricole	11,6	3,1	2,6

Source : TFDD

2.3.7. Procédés industriels

Les principales évolutions des variables exogènes du secteur des procédés industriels sont reprises dans le tableau 24. Ce tableau donne, selon la variable, soit le niveau atteint en 2050, soit le taux de croissance annuel moyen sur la période 2011-2050. Le taux de croissance annuel de l'activité est calculé à partir de la croissance du PIB comme expliqué à la section 2.2. Pour l'industrie, il s'élève à 1% dans Pyramide et 0,5% dans Mosaïque.

Dans les deux scénarios, les facteurs d'émissions des procédés industriels diminuent de 2% par an entre 2011 et 2050. Cette diminution est due, dans des proportions différentes pour chaque scénario, au progrès technique et au changement des modes de consommation et de production (voir section 2.1).

Pour les gaz fluorés, l'hypothèse faite est celle d'une réduction linéaire entre 2011 et 2050, pour aboutir en 2050 à une réduction totale de 90% par rapport à 2011. Cette hypothèse correspond à une politique volontariste de remplacement des gaz fluorés par des alternatives n'ayant pas d'impact sur le réchauffement global.

La capture et séquestration du carbone (CCS) peut être utilisée dans l'industrie, étant donné les flux concentrés de CO₂ générés dans certains procédés (sidérurgie, cimenteries, chimie...). Le tableau 24 donne également le niveau d'utilisation du CCS pour diminuer les émissions liées aux procédés industriels dans les deux scénarios.

Tableau 24 Principales évolutions pour les procédés industriels

2011-2050	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel de la production industrielle	1,0%	0,5%
Taux de croissance annuel des facteurs d'émission	-2,0%	-2,0%
Contribution des changements technologiques	-2,0%	-0,5%
Contribution des changements des modes de consommation et de production	-0,0%	-1,5%
Réduction totale des émissions de gaz fluorés	-90%	-90%
CO ₂ capturé et séquestré en 2050 à partir des procédés industriels	2,0 Mt	2,0 Mt

Source : TFDD

Les émissions totales de GES des procédés industriels, calculées comme décrit au point 1.4.8, sont reprises dans le tableau 25.

Tableau 25 Émissions de GES du secteur procédés industriels
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur procédés industriels	11,3	4,4	3,5

Source : TFDD

2.3.8. Transport international aérien et maritime

L'évolution du trafic international est indépendante des changements qui surviennent en Belgique. Les évolutions du trafic international sont dès lors proposées sur la base des évolutions sociétales de chaque scénario (décrites dans TFDD, 2007) et de façon à permettre une diminution des émissions globales de GES. Ces évolutions des variables exogènes du secteur du transport international aérien et maritime, sont reprises dans le tableau 26. Ce tableau donne pour chaque variable le taux de croissance annuel moyen sur la période 2011-2050.

Tableau 26 Principales évolutions pour le transport international aérien et maritime

2011-2050	Pyramide	Mosaïque
Taux de croissance annuel du trafic aérien	0,00%	0,00%
Taux de croissance annuel du trafic maritime	-0,49%	-1,13%
Taux de croissance annuel des facteurs d'émissions - trafic aérien	-2,31%	-2,31%
Taux de croissance annuel des facteurs d'émissions - trafic maritime	-1,60%	-1,60%

Source : TFDD

Dans ce secteur, les seules variables exogènes utilisées sont le trafic (mesuré en véhicule-km) et sur les facteurs d'émission (en tonnes de CO₂ éq. par km).

Dans les deux scénarios, le trafic aérien en 2050 est au même niveau qu'en 2011. Le trafic maritime diminue de 0,49% par an dans Pyramide, et de 1,13% par an dans Mosaïque, qui est moins centré sur la coordination internationale que Pyramide.

Dans le transport aérien, suivant Akerman (2005), l'utilisation de turbopropulseurs à hélices transsoniques permettrait un gain de 56% des émissions par siège-kilomètre disponible par rapport à la moyenne de la flotte actuelle. Un gain de 65% serait possible en remplaçant les avions actuels par des ailes volantes équipées de turbopropulseurs à hélices transsoniques. Il est supposé que l'ensemble de la flotte aérienne mondiale est renouvelée entre aujourd'hui et 2050. Dans ces conditions, le facteur d'émission du secteur aérien pourrait dès lors être amélioré de 65% entre 2005 et 2050, soit 2,31% par an. Il faut noter que Akerman (2005) inclut dans son évaluation des progrès des facteurs d'émission une augmentation des taux d'occupation de 71% à 79% entre 2005 et 2050. Cette évolution est supposée dans les deux scénarios. Il faut noter que le faible taux de renouvellement observé dans ce secteur pourrait toutefois rendre difficile le renouvellement complet de la flotte.

Dans le transport maritime, les facteurs d'émission peuvent diminuer significativement par rapport à la situation actuelle. D'après le rapport "Second IMO GHG Study 2009" (IMO, 2009), le potentiel de réduction des facteurs d'émission des navires est de 25% à 75% entre 2007 et 2050. La présente étude retient la

valeur médiane de cette fourchette, soit -50% ou un taux annuel de -1,60%. Ces réductions sont obtenues par des améliorations techniques et opérationnelles.

Dans ces deux cas du transport aérien et du transport maritime, il est important de remarquer qu'une partie significative des gains des facteurs d'émission est liée à une réduction des vitesses moyennes, de l'ordre de 20 à 30% au moins, comme établi par IMO (2009) et proposé par Savy (2010). C'est une inversion radicale de la tendance actuelle d'augmentation des vitesses.

Les émissions totales de GES du transport international aérien et maritime, calculées comme décrit au point 1.4.9, sont reprises dans le tableau 27.

Tableau 27 Émissions de GES du transport international aérien et maritime
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur transport international aérien et maritime	29,6	13,1	10,6

Source : TFDD

2.3.9. Divers

Les principales évolutions des variables exogènes du secteur "Divers" sont reprises dans le tableau 28. Ce tableau donne pour chaque variable, soit le taux de croissance annuel moyen sur la période 2011-2050, soit le niveau atteint en 2050.

Pour les secteurs considérés dans cette section, les projections sont les mêmes dans les deux scénarios.

Pour le secteur des autres émissions liées à la consommation d'énergie, qui comprend principalement les émissions des activités militaires, il a été supposé que les émissions restent stables sur la période 2011-2050. Les émissions fugitives diminuent de 5% par an et celles liées à l'utilisation de solvants de 1,53% par an. Enfin, dans les deux scénarios, la société évolue vers des modes de consommation et de production qui réduisent au maximum les déchets. Les émissions du secteur des déchets deviennent donc nulles en 2050 et diminuent progressivement entre 2011 et 2050.

Tableau 28 Principales évolutions pour le secteur "Divers"
Taux de croissance annuel 2011-2050

	Pyramide	Mosaïque
Autres émissions liées à la consommation d'énergie (CRF 1.A.5)	0,0%	0,0%
Émissions fugitives (CRF 1.B)	-5,0%	-5,0%
Solvants (CRF 3)	-1,53%	-1,53%
Déchets (CRF 6) - niveau des émissions de GES en 2050	0	0

Source : TFDD

Les émissions totales de GES du secteur "Divers", calculées comme décrit au point 1.4.10, sont reprises dans le tableau 29.

Tableau 29 Émissions de GES du secteur "Divers"
Mt CO₂ éq.

	2011	Pyramide - 2050	Mosaïque - 2050
Secteur "Divers"	2,4	0,4	0,4

Source : TFDD

Boîte 1 Principaux changements depuis les scénarios publiés en 2007

Pour le volet climat et énergie des scénarios, l'Objectifs de développement durable (ODD) portant sur la limitation du réchauffement global à 2°C au-dessus des températures préindustrielles est crucial. Pour les scénarios Pyramide₀₇ et Mosaïque₀₇, en fonction de l'état des connaissances en 2007 (basé sur le 3^{ème} Rapport d'évaluation du GIEC), cet ODD était traduit par une réduction des émissions de GES de 70% entre 1990 et 2050. Pour la mise à jour mécanique de ces scénarios présentée dans ce working paper, suivant le 4^{ème} Rapport du GIEC, cet ODD est maintenant traduit par une réduction de 80% des émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 1990 et 2050.

Au niveau macroéconomique, l'hypothèse de croissance du PIB était en 2007 de 1,78% par an, ceci sur la base du scénario de référence du Rapport du Comité d'étude sur le vieillissement de 2006. Dans cette mise à jour, sur la base du scénario de référence du Rapport du Comité d'étude sur le vieillissement de 2012, cette hypothèse est maintenant de 1,64% par an. C'est l'activité du secteur des services qui est modifiée dans cette mise à jour pour prendre en compte cette différence de PIB. Le taux de croissance de l'activité de ce secteur diminue d'environ 0,3 point de pourcentage (pp) entre cette mise à jour et les scénarios de 2007.

Au niveau démographique, l'hypothèse de croissance de la population était en 2007 de 0,10% par an, également sur la base du scénario de référence du Rapport du Comité d'étude sur le vieillissement de 2006. Dans cette mise à jour, sur la base du scénario de référence du Rapport du Comité d'étude sur le vieillissement de 2012, ces hypothèses sont maintenant de 0,45% par an. D'autre part, il était supposé dans les scénarios de 2007 que le nombre moyen de personnes par ménage atteignait 2,08 personnes par ménage en 2030 dans les deux scénarios. Ce nombre restait stable jusqu'en 2050 dans Pyramide₀₇ et augmentait jusque 2,28 dans Mosaïque₀₇. Dans cette mise à jour, ce nombre atteint 2,19 en 2030 et 2,40 en 2050 dans le cas de Mosaïque₁₃. La conséquence de ces hypothèses est que le nombre de ménages, et donc de logements, est plus élevé dans cette mise à jour que dans les scénarios de 2007.

Le renforcement de la réduction des émissions de GES dans cette mise à jour est en partie réalisé par le fait que le taux de croissance du PIB est moins élevé dans cette version. Les autres principaux raisons sont reprises ci-dessous.

- La capture du CO₂ (CCS) est utilisée dans l'industrie (version 2013) à hauteur de 62 Mt sur l'ensemble de la période 2020-2050 dans cette mise à jour. Elle n'était pas utilisée dans les scénarios de 2007.
- Une correction apportée au calcul des émissions liées à la production d'électricité dans les incinérateurs de déchets ménagers diminue ces émissions de 2,3 Mt en 2050.
- Une modélisation plus détaillée du secteur agricole permet de prendre en compte la diminution supposée de consommation de viande et de calculer de façon plus précise les consommations d'énergie des cultures sous serre. En conséquence, les émissions du secteur agricole diminuent de 15 pp en plus dans cette mise à jour que dans les scénarios de 2007.
- Suite à l'étude *Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050* (BFP et al., 2012), les potentiels d'énergie renouvelable ont été modifiés, Cette modification est à la baisse pour l'éolien off-shore (8GW au lieu de 14GW), à la hausse pour l'éolien on-shore (9GW au lieu de 5GW), le solaire (250 km² au lieu de 100 km²), la biomasse (100 PJ domestique, 200 PJ importé, au lieu de 49 PJ domestique). Un potentiel géothermique de 4 GW a également été introduit. En conséquence, la production d'énergie éolienne est plus faible dans cette mise à jour que dans les scénarios de 2007, tandis que la production d'énergie solaire et de biomasse est plus élevée. Il en résulte que la part des énergies renouvelables est plus élevée dans cette mise à jour (de 14 pp dans Pyramide et de 4 pp dans Mosaïque) que dans les scénarios de 2007.

2.4. Conclusions

Les tableaux 30 et 31 montrent le total des émissions de GES calculé avec *TransAccount* pour les scénarios *Pyramide*₁₃ et *Mosaïque*₁₃. Ces deux scénarios sont des mises à jour mécaniques (cfr l'introduction de ce working paper) des scénarios de 2007 et ne sont présentés que pour illustrer le fonctionnement du modèle. Le prochain Rapport fédéral sur le développement durable présentera une révision approfondie de ces scénarios.

Dans ces deux tableaux, les trois premières colonnes donnent le niveau des émissions pour 1990, 2011 et 2050, en kt CO₂ éq. Les trois colonnes suivantes donnent le taux de croissance pour les périodes 1990-2011, 1990-2050 et 2011-2050. Enfin, les trois dernières colonnes donnent le taux de croissance annuel moyen pour ces trois mêmes périodes.

Tableau 30 Émissions de GES en Belgique - scénario *Pyramide*₁₃
Mt CO₂ éq.

	Émissions			Croissance totale			Croissance annuelle		
	1990	2011	2050	90-11	90-50	11-50	90-11	90-50	11-50
Total (sans les soutes internationales)	143.9	120.2	21.6	-16%	-85%	-82%	-0.9%	-3.1%	-4.3%
Soutes internationales	16.4	29.6	12.8	80%	-22%	-57%	2.8%	-0.4%	-2.1%
Total (y compris les soutes internationales)	160.3	149.8	34.4	-7%	-79%	-77%	-0.3%	-2.5%	-3.7%

Source : TFDD

Tableau 31 Émissions de GES en Belgique - scénario *Mosaïque*₁₃
Mt CO₂ éq.

	Émissions			Croissance totale			Croissance annuelle		
	1990	2011	2050	90-11	90-50	11-50	90-11	90-50	11-50
Total (sans les soutes internationales)	143.9	120.2	26.8	-16%	-81%	-78%	-0.9%	-2.8%	-3.8%
Soutes internationales	16.4	29.6	10.4	80%	-37%	-65%	2.8%	-0.8%	-2.6%
Total (y compris les soutes internationales)	160.3	149.8	37.2	-7%	-77%	-75%	-0.3%	-2.4%	-3.5%

Source : TFDD

Dans la mise à jour mécanique présentée dans ce working paper, les émissions de GES réalisées sur le territoire belge diminuent de plus de 80% entre 1990 et 2050. La réduction des émissions dues au trafic aérien et maritime international (les soutes), qui sont comptabilisées séparément des autres émissions, est de 22% dans *Pyramide* et 37% dans *Mosaïque*. En incluant les soutes, la réduction est de 79% dans *Pyramide* et 77% dans *Mosaïque*. Les quatre secteurs qui contribuent le plus à cette réduction sont la production d'énergie, l'industrie, le transport et le secteur résidentiel.

Pour réaliser ces mises à jour, les hypothèses de potentiel d'énergie renouvelable ont été reprises de l'étude *Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050* (BFP et al., 2012). Toutefois, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire atteint environ 40% en 2050 dans ces mises à jour, alors qu'elle atteint 100% dans l'étude *100% renouvelable*. Deux raisons expliquent cette différence.

- Premièrement, cette mise à jour a été réalisée de façon mécanique. L'importance des énergies renouvelables reste donc similaire à celle qui avait été calculée dans les scénarios de 2007. Dans la révision complète des scénarios qui sera publiée en 2014, l'importance des énergies renouvelables

pourrait être amenée à évoluer plus rapidement, en fonction du progrès des connaissances et des changements de modes de consommation et de production qui seront inclus dans les scénarios révisés.

- Deuxièmement, les scénarios de l'étude 100% renouvelable ne portaient que sur un seul objectif : une part de 100% des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire. Cet objectif porte sur un mode de production. Or, les scénarios de développement durable sont préparés dans le cadre conceptuel du modèle TransGovern (TFDD, 2005, p20-33) et avec une méthodologie de backcasting. Les ODD adoptés comme image finale devraient dès lors uniquement porter sur l'état des capitaux de base du développement (TFDD, 2007, p6), tels que l'état de l'atmosphère, la préservation des ressources naturelles, l'inclusion sociale, l'éducation ou la santé. Fixer une contrainte a priori sur un mode de production ne peut être envisagé que s'il existe une base légale qui le demande, ce qui n'est pas le cas pour les énergies renouvelables à l'horizon 2050. L'offre d'énergie renouvelable, en combinaison avec d'autres politiques portant (par exemple sur l'efficacité énergétique ou la gestion de la demande), contribue bien entendu à la réalisation d'ODD, en particulier l'objectif de réduction des émissions de GES. Mais un objectif moins élevé sur la part des énergies renouvelables, combinés à des mesures renforcées dans d'autres domaines, pourraient apporter une contribution similaire à la réduction des émissions de GES, tout en apportant une contribution plus importante aux autres ODD.

Une autre étude récente est celle réalisée par CLIMACT et VITO (2013), intitulée "*Transition de la Belgique vers une société bas carbone*". Cette étude était également centrée sur l'atteinte d'un seul objectif, la réduction des émissions de GES, plutôt qu'un ensemble d'ODD. Les scénarios qui seront présentés dans le prochain rapport fédéral sur le développement durable intégreront les informations utiles issues de ces travaux récents.

3. Bibliographie

- Abu-Sharkh Suleiman, Arnold R. J., Kohler J., Lia RI, Markvarta T., Ross J.N., Steemers K., Wilson P., Yao R. (2006), *Can microgrids make a major contribution to UK energy supply?*, Renewable and sustainable Energy Review 10 (2006) 78-127.
- Aernouts K., Jaspers K. 2012, *Energie balans Vlaanderen 2010*, Referentieteaak 2012/TEM/R/154, Mol: VITO, novembre 2012 (www.emis.vito.be, consulté le 16 juillet 2013).
- Ahlroth Sofia, Höjer Mattias (2007), *Sustainable energy prices and growth: comparing macroeconomic and backcasting scenarios*, Ecological economics 63 (2007) pp 722-731.
- Akerman (2005), *Sustainable air transport - on track in 2050*. Transportation Research part D 10 (2005), pp. 111-126.
- Bassilière Delphine, Baudewyns Didier, Bossier Francis, Bracke Ingrid, Lebrun Igor, Stockman Peter, Willemé Peter (2013), *A new version of the HERMES model - HERMES III*, Working paper 13-13 du Bureau federal du Plan, www.plan.be (6 décembre 2013).
- Boardman Brenda, Darby Sarah, Killip Gavin, Hinnells Gavin, Jardine Christian N., Palmer Jane and Sinden Graham (2005), *The 40% house*, Oxford: Environmental change institute, Oxford University, <http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/40house.php> (6 septembre 2010).
- BFP, ICEDD, VITO: Devogelaer Danielle, Duerinck Jan, Gusbin Dominique, Marenne Yves, Nijs Wouter, Orsini Marco, Pairon Marie, 2012. *Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050*, www.plan.be (consulté le 26 juin 2013).
- Bristow Abigail, Pridmore Alison, Tight Miles, May Tony, Berkhout Frans, Harris Michelle. (2004), *How can we reduce carbon emissions from transport?*, Tyndall Centre for Climate Change Research working paper 15, June 2004.
- Bureau fédéral du Plan (2006), *La politique climatique post-2012 : analyse de scénarios de réductions d'émissions aux horizons 2020 et 2050*. Bruxelles : Bureau fédéral du Plan, www.plan.be.
- Bureau fédéral du Plan (2013), *base de données transport*, www.plan.be (consulté en mars 2013).
- Bureau fédéral du Plan (2011), *Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030*, Bruxelles : Bureau fédéral du Plan, www.plan.be.
- CLIMACT, VITO (2013), *Transition de la Belgique vers une société bas carbone*, www.climat.be/2050 (28 novembre 2013).
- CMED (1987). *Notre avenir à tous*. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Montréal : Editions du Fleuve (aussi appelé Rapport Brundtland).
- CNC – Commission nationale climat, (2010) : *Inventaire national d'émissions de GES 2010, v1.4*, disponible sur www.climat.be.
- CNC – Commission nationale climat, (2013) : *Inventaire national d'émissions de GES 2011, v1.2*, disponible sur www.climat.be.
- Concawe, EUCAR, JRC (2005), *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Joint Research Centre.

- Conseil supérieur des finances - Comité d'étude sur le vieillissement (2012), *Rapport annuel*, octobre 2012.
- Conseil supérieur des finances - Comité d'étude sur le vieillissement (2013), *Rapport annuel*, juillet 2013.
- De Herde A., Berghmans J. Duprez H., Verplaetsen F., Hens H., Verbeeck G., Flamant G., Vekemans G. (2000), *Comparaison de systèmes de chauffage de logements - Projet "Connaissance des émissions de CO₂" pour Electrabel/SPE, phase 2 - sous-projet 4*. UCL Architecture et Climat, March 2000.
- De Vlioger I., Pelkmans L., Verbeiren S., Cornelis E., Schrooten L., Int Panis L., Proost S., Knockaert J. (2005), Sustainability assessment of technologies and modes in the transport sector in Belgium - SUSATRANS, Bruxelles : project financed by the Belgian Science Policy under the Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy.
- Dreborg Karl H. (1996), Essence of backcasting, *Futures* Vol. 28, No 9, pp 813-828.
- Enerdata, ECN, Max-Planck-Institut für PlasmaPhysik, Universiteit Utrecht, Verbundplan, STE Juelich (2005), *VLEEM 2 final report*, May 2005. Bruxelles : EC/DG Research. <http://www.vleem.org> (31/10/07).
- Eurostat (2013), *base de données en ligne*, (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu> consulté le 26 mars 2013).
- GFEI (2009), *the 50by50 report*, Global fuel economy initiative, www.globalfueleconomy.org.
- Hens H., Verbeeck G., Verdonck B. (2001), *Impact of energy efficiency measures on the CO₂ emissions in the residential sector, a large scale analysis*, *Energy and Buildings* 33 (2001) 275-281.
- ICEDD 2012, *Bilan énergétique de la Wallonie 2010, Secteur domestique et équivalents*, septembre 2012 (<http://energie.wallonie.be/fr/bilan-energetique-wallon.html?IDC=6288>, consulté le 26 juin 2013).
- IEA (2004), *Prospects for CO₂ capture and storage*, OECD/IEA (<http://www.oecd-ilibrary.org/energy>).
- IEA (2005), *Prospects for hydrogen and fuel cells*, Paris: International Energy Agency.
- IEA (2008), *Energy technology perspectives 2008*, OECD/IEA, <http://www.iea.org/techno/etp/> (20 Sep 2010).
- IMO - International Maritime organisation (2009), *Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG study 2009*, IMO, MEPC59/INF.10, 9 avril 2009, www.imo.org (12 oct 2010).
- IPCC (2007), *Climate change 2007, Mitigation of climate change, contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report*, Geneva: IPCC.
- IPCC (2013), *Climate change 2013, the physical science basis, contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Report*, Geneva: IPCC.
- Jespers K., Aernouts K., Dams Y. (2012), *Inventaris duurzame energie in Vlaanderen 2011, deel II: WKK*, Mol: VITO, novembre 2012 (www.emis.vito.be, www.cogenvlaanderen.be (consulté le 16 juillet 2013)).
- Marbaix Philippe, van Ypersele Jean-Pascal (sous la direction de) (2004), *Impact des changements climatiques en Belgique*, Bruxelles : Greenpeace.

Moniteur belge (2013), *Arrêté royal du 18 juillet 2013 portant fixation de la vision stratégique fédérale à long terme de développement durable*, Bruxelles: Moniteur belge du 10 octobre 2013.

Savy, Michel (2010), *Le fret mondial et le changement climatique*, Centre d'analyse stratégique, www.strategie.gouv.fr (25 Sep 2010).

UNFCCC (1997), *Protocole de Kyoto*, UNFCCC, www.unfccc.int.

TFDD (2007) – Task force développement durable, *Accélérer la transition vers un développement durable*, Rapport fédéral sur le développement durable 2007. Bruxelles : Bureau fédéral du Plan.

WBCSD (2005), *Pathways to 2050, energy and climate change*, World business council for sustainable development, www.wbcsd.org (07 Sep 2010)