

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse de l'impact de différents scénarios énergétiques sur l'Empreinte écologique en Belgique

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
VAN DE MAELE, Marjan
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Année Académique : 2010-2011

Directeur : Ir. Michel HUART

Résumé

Cette recherche vise à évaluer l'impact de différents scénarios énergétiques sur l'Empreinte écologique (EE) belge. Elle se limite à l'énergie électrique, dont la consommation valait 20% de la consommation totale d'énergie finale en Belgique en 2007. Ainsi, cette étude répond à deux questions : *'Quel est l'impact de différents scénarios de production d'électricité belge sur l'environnement, selon l'EE?'* et *'Est-ce que l'EE est un bon indicateur des pressions environnementales exercées par la production d'électricité?'*

L'Empreinte écologique (EE) mesure la surface biologiquement productive (terrestre et aquatique) dont une personne, une population ou une activité a besoin pour produire toutes les ressources consommées et pour absorber tous les déchets produits, compte tenu des technologies disponibles et des pratiques de gestion mises en œuvre. En comparant l'EE à la biocapacité, la capacité des écosystèmes à produire la matière biologique et à absorber les déchets, la soutenabilité de nos modes de vie peut être évaluée.

Ainsi, l'EE belge a été calculée selon neuf scénarios de production d'électricité différents. Il s'agit de cinq scénarios concernant le bouquet électrique et quatre scénarios d'utilisation rationnelle d'énergie (URE) électrique. L'EE de chaque scénario est comparée à celle du scénario de référence, la situation de production d'électricité réelle en Belgique en 2007. Cinq des neuf scénarios testés permettent de diminuer l'EE belge : le scénario nucléaire, qui vise une production à 100% nucléaire, entraîne la plus grande diminution. Il faut néanmoins garder à l'esprit que de nombreux impacts, qui ne sont pas considérés par l'EE, découlent de l'énergie nucléaire. Ensuite, le scénario qui vise une production sur base d'énergies renouvelables (ER), comblée par de la biomasse, et les scénarios URE induisent également une baisse de l'EE belge. Seul le scénario URE, qui ne vise qu'une réduction de la production de 7% et qui favorise les ER, a une EE plus élevée que le scénario de référence. Afin qu'un changement de cap vers une production sur base d'ER puisse avoir des effets positifs, il doit par conséquent être accompagné d'une politique d'URE ambitieuse. Il faut néanmoins mettre les résultats en perspective : même le scénario le plus avantageux n'induit qu'une diminution de l'EE de 5%. L'impact très réduit des différents scénarios sur l'EE belge totale s'explique en partie par l'importance de l'EE des importations et des exportations par rapport à l'EE de la production belge. La politique énergétique belge doit donc inévitablement être située dans un contexte européen et mondial.

Néanmoins, la valeur de l'EE en tant qu'indicateur des pressions environnementales liées à la production d'électricité est limitée, vu qu'elle n'inclut qu'une partie limitée des impacts qui découlent de cette production. Puis, les hypothèses qui sous-tendent l'EE ne sont pas toujours claires, ni adaptées à la situation belge. Le poids (et donc l'appréciation de l'importance) qui est attribué aux différents composants n'est pas explicité non plus. Ensuite, les résultats n'atteignent pas un niveau de précision et de détail qui permette un classement correct ni une analyse plus approfondie de la contribution des différents composants au classement final. Finalement, l'EE n'arrive pas non plus à comptabiliser les effets des impacts sur le long terme.

Table des matières

Résumé.....	2
Remerciements.....	8
Introduction.....	9
Question de recherche.....	11
Méthodologie.....	12
Chapitre 1 : l'Empreinte écologique.....	13
1 Principes généraux de l'Empreinte écologique.....	13
1.1 Vision et objectifs de l'Empreinte écologique.....	13
1.2 Opérationnalisation et hypothèses de l'Empreinte écologique.....	17
1.3 Méthode de calcul de l'Empreinte écologique dans les Comptes Nationaux d'Empreinte.....	20
1.4 Evolution continue de l'Empreinte écologique.....	28
2 Evolution et tendances actuelles de la biocapacité et de l'Empreinte écologique.....	29
2.1 La biocapacité et l'Empreinte écologique mondiale.....	29
2.2 L'Empreinte écologique de la Belgique et de la Flandre.....	31
3 Analyse critique de l'Empreinte écologique.....	35
3.1 Les principales critiques	35
3.2 Faiblesses des CNE spécifiques pour la Belgique.....	47
3.3 Améliorations prévues.....	50
Chapitre 2 : analyse de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires.....	51
1 Représentation de l'électricité issue de différentes énergies primaires dans l'Empreinte écologique.....	51
1.1 L'électricité issue des énergies fossiles	51
1.2 L'électricité issue de l'énergie nucléaire.....	54
1.3 L'électricité issue des énergies renouvelables.....	55
2 L'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires.....	57
2.1 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue des énergies fossiles.....	58
2.2 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie nucléaire.....	63
2.3 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie hydraulique.....	65
2.4 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie éolienne.....	68
2.5 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie solaire photovoltaïque.....	70
2.6 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de la biomasse.....	72
3 Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires.....	74
4 Discussion des résultats : incertitudes et critiques.....	75

Chapitre 3 : analyse de l'Empreinte écologique selon différents scénarios de production d'électricité	84
1 L'impact de différents bouquets électriques sur l'Empreinte écologique belge.....	86
2 L'impact de différents scénarios d'URE électrique sur l'Empreinte écologique belge.....	95
3 Comparaison des différents scénarios de production d'électricité belge.....	98
4 Discussion des résultats.....	100
Conclusions.....	104
1 Discussion des principaux résultats.....	104
2 Quel rôle pour l'Empreinte écologique comme indicateur des impacts énergétiques ?	108
2.1 Analyse des principaux atouts et faiblesses évoqués dans la littérature.....	108
2.2 Analyse critique des calculs effectués	111
2.3 Recommandations pour l'évaluation des scénarios de production d'électricité.....	113
Liste des principaux sigles utilisés.....	116
Glossaire.....	119
Ressources bibliographiques.....	131
Annexes.....	137
1 Annexe 1 : méthode de calcul de l'EE et de la biocapacité dans les CNE par type de sol.....	137
2 Annexe 2: facteurs constants utilisés dans les CNE, édition 2010.....	141
3 Annexe 3 : données de base pour le calcul de l'intensité d'EE de différents vecteurs énergétiques.....	141
4 Annexe 4 : méthode de calcul de l'EE des différents scénarios de production d'électricité.....	145
5 Annexe 5 : recherche bibliographique effectuée.....	160

Liste des graphiques

Graphique 1: Surfaces mondiales par type de sol en ha et en ha _g en 2007 (en millions).....	21
Graphique 2: Indice d'appropriation et classification des terres.....	25
Graphique 3: L'évolution de la biocapacité mondiale en ha _g par personne, 1961-2007.....	29
Graphique 4: L'évolution de l'EE mondiale en nombre de planètes, 1961-2007	30
Graphique 5: L'évolution de l'EE belge par type de sol, 1961-2006.....	32
Graphique 6: L'évolution de l'Empreinte carbone belge par secteur économique, 1961-2006.....	33
Graphique 7: L'évolution de l'Empreinte carbone belge du secteur industriel, 1961-2006.....	34
Graphique 8: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue des différentes énergies primaires	82
Graphique 9: Comparaison de l'intensité d'EE sur base d'hypothèses alternatives	82
Graphique 10: Comparaison de l'intensité d'EE en tenant compte du stockage	82

Graphique 11: Comparaison de l'EE pour différents bouquets électriques en Belgique en 2007.....	100
Graphique 12: Comparaison de l'EE pour les scénarios d'URE électrique en Belgique en 2007.....	100
Graphique 13: Comparaison de l'EEc pour différents bouquets électriques sans et avec EE _{ce} fixe.....	101
Graphique 14: Comparaison de l'EEc pour différents scénarios URE sans et avec EE _{ce} fixe.....	102

Liste des figures

Figure 1: L'Empreinte écologique.....	15
Figure 2: Le déficit écologique.....	17
Figure 3: Représentation de l'Empreinte écologique.....	18

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison de l'EE _c flamande selon les CNE et selon le modèle d'E/S.....	49
Tableau 2: Représentation des différents systèmes énergétiques dans l'EE.....	57
Tableau 3: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une centrale thermique sur base de gaz naturel.....	59
Tableau 4: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base du gaz naturel.....	60
Tableau 5: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une centrale électrique sur base de charbon.....	62
Tableau 6: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base du charbon.....	62
Tableau 7: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une centrale électrique nucléaire.....	64
Tableau 8: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base d'énergie nucléaire.....	64
Tableau 9: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une centrale électrique hydraulique.....	66
Tableau 10: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base d'énergie hydraulique.....	67
Tableau 11: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une installation éolienne.....	68
Tableau 12: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base d'énergie éolienne.....	69
Tableau 13: Emissions de CO ₂ liées à la construction d'une centrale solaire photovoltaïque.....	70
Tableau 14: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base d'énergie solaire photovoltaïque.....	71
Tableau 15: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base de déchets industriels et municipaux.....	73
Tableau 16: Composants de l'EE d'un TWh _c sur base du bois cultivé à des fins énergétiques.....	73
Tableau 17: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires.....	75
Tableau 18: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité sur base d'hypothèses alternatives.....	81
Tableau 19: Classement de l'électricité issue de différents énergies primaire selon l'intensité d'EE.....	83
Tableau 20: Production d'électricité et capacité installée par vecteur énergétique en Belgique en 2007.....	87
Tableau 21: Capacités et impacts par vecteur énergétique.....	87
Tableau 22: EE pour la situation énergétique réelle en Belgique en 2007.....	88

Tableau 23: EE _c pour la situation énergétique réelle en Belgique en 2007.....	89
Tableau 24: EE pour le scénario fossile en Belgique en 2007.....	90
Tableau 25: EE _c pour le scénario fossile en Belgique en 2007.....	90
Tableau 26: EE pour le scénario nucléaire en Belgique en 2007.....	91
Tableau 27: EE _c pour le scénario nucléaire en Belgique en 2007.....	91
Tableau 28: EE pour le scénario biomasse en Belgique en 2007.....	92
Tableau 29: EE _c pour le scénario biomasse en Belgique en 2007.....	92
Tableau 30: EE pour le scénario ERbiomasse en Belgique en 2007.....	93
Tableau 31: EE _c pour le scénario ERbiomasse en Belgique en 2007.....	93
Tableau 32: EE pour le scénario ERélectricité en Belgique en 2007.....	94
Tableau 33: EE _c pour le scénario ERélectricité en Belgique en 2007.....	94
Tableau 34: EE pour le scénario UREstab.-norm. en Belgique en 2007.....	95
Tableau 35: EE pour le scénario UREréd.-norm. en Belgique en 2007.....	96
Tableau 36: EE _c pour le scénario UREstab.-norm. en Belgique en 2007.....	96
Tableau 37: EE _c pour le scénario UREréd.-norm. en Belgique en 2007.....	96
Tableau 38: EE pour le scénario UREstab.-ER en Belgique en 2007.....	97
Tableau 39: EE pour le scénario UREréd.-ER en Belgique en 2007.....	97
Tableau 40: EE _c pour le scénario UREstab.-ER en Belgique en 2007.....	98
Tableau 41: EE _c pour le scénario UREréd.-ER en Belgique en 2007.....	98
Tableau 42: Comparaison de l'EE pour différents bouquets électriques en Belgique en 2007.....	99
Tableau 43: Comparaison de l'EE pour les scénarios d'URE électrique en Belgique en 2007.....	99
Tableau 44: Classement des différents scénarios de production d'électricité selon l'importance de l'EE.....	103
Tableau 45: Estimation de l'impact sur l'EE belge en 2020 des objectifs du NREAP et du NEEAP.....	106
Tableau 46: EE _c selon une intensité carbone des importations égale à celle de la production belge.....	107
Tableau 47: Facteurs d'équivalence par type de sol dans les CNE, édition 2010.....	141
Tableau 48: Facteurs constants pour le calcul de l'Empreinte carbone dans les CNE, édition 2010.....	141
Tableau 49: Coefficients d'émission de CO ₂ des sources d'énergie primaire fossile.....	141
Tableau 50: Rendements annuels d'exploitation des installations de la filière électrique classique.....	142
Tableau 51: Temps de retour énergétique, durée de vie et rapport énergétique par vecteur énergétique.....	142
Tableau 52: Rendements et nécessités de terre pour différentes énergies renouvelables.....	143
Tableau 53: Production d'électricité et thermique par filière de biomasse en 2008.....	143
Tableau 54: Coefficients d'émission de CO ₂ des sources d'énergie primaire issue de la biomasse.....	144
Tableau 55: Exemple d'autres calculs d'EE pour la production d'un TWh/an.....	144
Tableau 56: Comparaison des coefficients d'émissions de CO ₂ du GIEC, de la CWaPE et du GGI.....	145
Tableau 57: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario fossile.....	145
Tableau 58: Apports d'émissions de CO ₂ et surfaces nécessaires pour le scénario fossile.....	146

Tableau 59: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario nucléaire.....	146
Tableau 60: Apports d'émissions de CO ₂ et surfaces nécessaires pour le scénario nucléaire.....	147
Tableau 61: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario biomasse.....	147
Tableau 62: Estimation du stock belge de biomasse par filière en 2020.....	148
Tableau 63: Estimation des importations de biomasse par filière pour le scénario biomasse.....	149
Tableau 64: Apports d'émissions de CO ₂ et surfaces nécessaires pour le scénario biomasse.....	149
Tableau 65: Emissions de CO ₂ (N1+N2) pour le scénario biomasse.	150
Tableau 66: Projections du potentiel technique électrique par vecteur d'énergie renouvelable.....	151
Tableau 67: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario ER.....	152
Tableau 68: Estimation des importations de biomasse pour le scénario ER.....	153
Tableau 69: Apports d'émissions de CO ₂ et surfaces nécessaires pour le scénario ER.....	153
Tableau 70: Emissions de CO ₂ (N1+N2) liées à la combustion de la biomasse pour le scénario ER.....	154
Tableau 71: Capacités installées et nécessaires par TWhe pour le scénario de référence.....	155
Tableau 72: Emissions de CO ₂ et surfaces nécessaires pour le scénario de référence.....	155
Tableau 73: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario UREstab.-norm.....	156
Tableau 74: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URErd.-norm.....	156
Tableau 75: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario UREstab.-ER.....	157
Tableau 76: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URErd.-ER.....	157
Tableau 77: Estimation de la production de biomasse domestique pour les différents scénarios URE.....	158
Tableau 78: TPES pour la production électrique domestique par scénario URE.....	159
Tableau 79: EE _c pour une production électrique à zéro émissions de CO ₂ en Belgique en 2007.....	159

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Ir. Michel Huart, directeur du présent MFE, pour le temps qu'il a consacré à la recherche d'un sujet qui nous intéressait tous les deux et pour sa proposition d'écrire un MFE sur l'Empreinte écologique. Je le remercie également pour les discussions très intéressantes qu'on a eu sur ce sujet et les nombreux conseils et informations précieux qu'il m'a donné.

J'aimerais aussi exprimer ma gratitude envers Catherine Dijon, Isabelle Raemdonck, Simon Cardon et Anne de Rooter pour la relecture et la correction de ce MFE.

Je voudrais également remercier Wouter Spitters, ainsi que de nombreux autres ami(e)s pour leur patience et leur soutien moral et logistique. Finalement, je suis très reconnaissante envers les professeurs de l'IGEAT, ainsi qu'envers mes collègues d'étude qui ont fait de ce master une expérience tellement enrichissante et agréable.

Introduction

L'Empreinte écologique (EE) exprime la demande de l'humanité vis-à-vis de la biosphère en termes de surfaces nécessaires pour fournir les ressources utilisées et pour absorber les déchets produits. Afin de pouvoir comparer la demande de différents pays, ces surfaces sont exprimées en hectares globaux, hectares avec un rendement moyen mondial. La Belgique occupait la 4^e place dans le classement mondial de l'EE en 2007, avec une moyenne de 8,2 hectares par Belge et par an. Si tout le monde vivait comme le Belge moyen, il faudrait 5 planètes pour produire toutes les ressources naturelles nécessaires et pour absorber tous les déchets produits (Pollard et al. 2010, p.39). En 2005, la production d'énergie à partir des combustibles fossiles représentait près de 45% de l'EE mondiale. Pour la Belgique, l'Empreinte carbone représentait également 43% de l'EE totale en 2006 (Boutaud et al. 2010, p.25).

L'utilisation rationnelle d'énergie (URE) et le développement des énergies renouvelables (ER) semblent donc constituer un levier important pour diminuer la pression que l'humanité exerce sur la terre. En 2008, dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, l'Union Européenne s'est effectivement engagée à réduire de 20% la consommation d'énergie par rapport à un scénario BAU (Business As Usual) et à augmenter la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique total de l'Union à 20% pour 2020. L'objectif à atteindre pour la Belgique est de 13%. Différents scénarios ont été établis pour atteindre cet objectif. Une étude d'EDORA, la fédération qui représente l'ensemble des producteurs d'énergie renouvelable, propose différents scénarios qui permettent même d'arriver à une part de 16 à 18% d'énergies renouvelables (EDORA & ODE Vlaanderen 2010). Au niveau Européen, l'EREC (European Renewable Energy Council) estime qu'il est même possible d'arriver à 100% d'énergies renouvelables d'ici 2050 (EREC 2010).

L'objectif de cette recherche est d'étudier l'impact de différents scénarios d'URE et de développement des filières d'ER sur l'EE belge. Je me limiterai à la production d'électricité, qui représentait 20% de la consommation totale d'énergie finale en 2007 en Belgique (Eurostat 2010, p.25). D'un côté, cette étude permettra d'analyser les impacts environnementaux des différents scénarios de production d'électricité. De l'autre côté, elle révélera également les plus importants atouts et faiblesses de l'Empreinte écologique en tant qu'indicateur des pressions environnementales liées à la production d'électricité.

Le présent MFE constitue un document assez volumineux. Il est néanmoins possible de lire certaines parties séparément et de se référer aux chapitres pertinents selon les intérêts et besoins du lecteur. Le premier chapitre analyse en détail l'EE. Ce chapitre permet une compréhension approfondie du concept et de la méthode de calcul de l'EE, ainsi que de ses atouts et faiblesses, tant au niveau conceptuel que méthodologique.

Le deuxième chapitre présente les résultats des calculs de l'intensité d'EE liée à la production d'électricité sur base de différentes énergies primaires (gaz naturel, charbon, biomasse, énergie nucléaire, hydraulique, éolienne et solaire). Il s'agit du nombre d'hectares globaux nécessaires à la production d'une quantité donnée d'électricité. Cette analyse permet d'étudier l'impact de la production d'électricité pour chaque énergie primaire de façon isolée, sans qu'il y ait des interactions entre variables. Ainsi il s'agit d'une étape préparatoire importante afin de calculer et interpréter l'EE des scénarios présentés dans le chapitre suivant. D'un côté, ce chapitre évalue les impacts liés à la production d'électricité à partir des énergies mentionnées. De l'autre côté, ces analyses révèlent certaines faiblesses de l'Empreinte écologique en termes d'indicateur des pressions environnementales de la production d'électricité.

Dans le troisième chapitre, les résultats des calculs de l'EE belge pour plusieurs scénarios de production d'électricité sont présentés. Il s'agit de quatre scénarios concernant le bouquet électrique et quatre scénarios d'utilisation rationnelle d'énergie (URE) électrique. Les scénarios concernant le bouquet électrique analysent l'impact sur l'EE belge d'un scénario de production d'électricité issue à 100% d'énergies fossiles, à 100% d'énergie nucléaire, à 100% d'énergie sur base de biomasse et à 100% d'énergies renouvelables (ER). Les scénarios d'URE concernent un scénario de stabilisation et un scénario de réduction de la production d'électricité, selon deux bouquets électriques différents. L'analyse des résultats permet de comparer l'impact des différents scénarios sur l'EE belge totale. A nouveau, ces calculs démontrent certaines faiblesses de l'Empreinte écologique comme indicateur des pressions environnementales de la production d'électricité.

Finalement, la conclusion résume les principaux résultats et évalue le rôle de l'EE comme indicateur des pressions environnementales liées à la production d'électricité. Les atouts et faiblesses de l'Empreinte écologique sont détaillés, suivis par une analyse critique des calculs qui ont été effectués. Pour conclure, des recommandations pour mesurer et évaluer les impacts environnementaux de la production d'électricité, sont avancées.

Question de recherche

Cette recherche vise à évaluer l'impact de différents scénarios de production d'électricité sur l'EE. L'objectif est double : d'un côté analyser les pressions environnementales liées aux différents scénarios de production d'électricité et de l'autre côté évaluer la valeur de l'EE comme indicateur des impacts environnementaux de cette production.

Les deux questions principales se répartissent en plusieurs questions intermédiaires :

- Quel est l'impact de différents scénarios de production d'électricité belge sur l'environnement selon l'EE?
 - Comment les impacts de la production d'électricité issue de différentes énergies primaires, sont-ils reflétés dans l'EE ?
 - Quel est l'impact de la production d'électricité issue de différentes énergies primaires selon l'EE ?
 - Quel est l'impact des différents scénarios d'URE selon l'EE ?
- L'EE est-elle un bon indicateur des pressions environnementales exercées par la production d'électricité?
 - Comment l'EE est-elle calculée ?
 - L'EE inclut-elle les impacts les plus pertinents liés à la production d'électricité ?
 - L'EE permet-elle un classement pertinent et valide des différents scénarios de production d'électricité ?

Méthodologie

Cette recherche a été effectuée en trois étapes. La première étape concerne la compréhension et la maîtrise de l'EE. Il s'agit de comprendre les hypothèses qui sous-tendent le concept et de maîtriser la méthode de calcul, ainsi que de déterminer la représentation des différents modes de production d'électricité dans l'EE et ses principaux atouts et faiblesses. La deuxième étape consiste à calculer l'intensité d'EE par mode de production. Il s'agit d'identifier les impacts des différents modes de production d'énergie (fossiles, nucléaire et renouvelables). Puis, il faut quantifier ces impacts et en déterminer l'EE par quantité d'électricité produite. La dernière étape concerne la détermination des scénarios de production d'électricité pertinents, tant en termes de bouquet électrique qu'en termes de quantité d'électricité produite, et le calcul de l'EE belge pour ces différents scénarios.

La première étape est effectuée sur base d'une recherche bibliographique approfondie. D'un côté, Wackernagel et Rees, les concepteurs de l'Empreinte écologique, ont publié de nombreuses articles et un livre de référence sur l'EE. De l'autre côté, le Global Footprint Network (GFN) a beaucoup investi dans la description et la documentation d'une méthode standardisée de calcul, la mise en place d'un glossaire... L'étude des fichiers excel des Comptes Nationaux d'Empreinte (CNE), édition 2010, a également aidé à clarifier la méthode de calcul. Toutes ces démarches ont permis une bonne compréhension du concept et de la méthode de calcul. Puis, l'EE a aussi été le sujet de nombreuses controverses dans la littérature scientifique. Plusieurs administrations publiques ont également publié des rapports d'évaluation sur son application pratique. Ainsi, les atouts et faiblesses sont largement documentés. Il n'a par conséquent pas été nécessaire d'effectuer des interviews supplémentaires. Une description détaillée des recherches bibliographiques effectuées figure en annexe 5.

Pour la deuxième étape, je me suis à nouveau basée sur une recherche bibliographique, afin de trouver des études ACV et des données statistiques pertinentes. Les rapports du GIEC ont également été une source d'information très précieuse, ainsi que les données statistiques disponibles sur le site web d'Eurostat et de l'International Energy Agency (IEA). Je me suis aussi basé sur les données disponibles sur le site web de la CWaPE et sur les données du National Renewable Energy Action Plan (NREAP). Finalement, sur base des données recensées, les calculs de l'intensité d'EE ont été effectués selon la méthode standard des CNE (voir plus loin).

Pour la troisième étape, l'étude d'EDORA, la fédération des producteurs d'énergie renouvelable, le NREAP, le National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) et une étude de Daniel Comblin ont servi de données de base pour déterminer des scénarios de production d'électricité pertinents. Les calculs ont été effectués sur base des fichiers excel des CNE, édition 2010, portant sur la Belgique et sur l'année 2007. Une description détaillée de la méthode de calcul figure en annexe 4.

Chapitre 1 : L'Empreinte écologique

Ce chapitre commence par éclairer le concept de l'Empreinte écologique (EE), ainsi que les hypothèses et les objectifs sous-jacents. Puis, la méthode de calcul de base de l'EE est expliquée. Ensuite, l'évolution et l'état actuel de l'EE et de la biocapacité mondiale, belge et flamande sont esquissés. Le chapitre est clôturé par une analyse critique des atouts et des faiblesses de l'EE en général, aussi bien au niveau conceptuel qu'au niveau de la méthode de calcul. Pour une analyse critique plus spécifique concernant l'EE comme indicateur des pressions environnementales liées à la production d'électricité, le lecteur peut se référer à la conclusion finale de ce MFE. Le lecteur souhaitant plus de détails concernant la méthode de calcul de l'EE, peut se référer à l'annexe 1.

1 Principes généraux de l'Empreinte écologique

1.1 Vision et objectifs de l'Empreinte écologique

L'Empreinte écologique comme indicateur de la soutenabilité écologique

La conception de l'Empreinte écologique (EE) s'inscrit dans le débat sur le 'sustainable development', traduit en français comme développement durable (ou soutenable). Ce concept est né d'une prise de conscience de plus en plus accrue des limites des ressources naturelles terrestres et du besoin de réconcilier le développement socioéconomique et la protection de l'environnement. Le développement soutenable est alors défini comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* »¹. Cette notion met donc l'accent sur la solidarité intergénérationnelle. Elle est conditionnée par une exigence de soutenabilité écologique, afin de rendre nos modes de vie compatibles avec la « *capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir* » (Boutaud & Gondran 2009, pp.11-19).

Le capital naturel est une notion centrale dans le discours sur le développement durable. Il peut être défini comme « *tous les aspects naturels matériels de la planète nécessaire à l'humanité, avant leur transformation par les activités humaines* » (Boutaud & Gondran 2009, p.44). Ainsi, il s'agit d'un stock d'actifs naturels qui produit de façon constante un flux de biens et de services. Le capital naturel ne se limite pas à l'inventaire de toutes les ressources industrielles, mais inclut également des services, comme l'assimilation des déchets, la régulation de l'érosion et des inondations, la protection des rayons ultraviolets... L'intégrité de ces composants de l'écosphère, et des relations structurelles entre elles, sont essentielles pour l'autoproduction et l'autorégulation des mécanismes qui stabilisent les conditions sur terre (Wackernagel & Rees 1996, p.35).

¹ Définition reprise du « rapport Brundtland ». Pour plus d'informations, voir Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (1989). *Notre avenir à tous*. Éditions du Fleuve, Montréal.

Deux écoles de pensée se distinguent autour du concept du développement durable: celle qui défend la 'soutenabilité faible' et celle de la 'soutenabilité forte'. Les défenseurs d'une soutenabilité faible estiment que la dégradation du capital naturel n'est pas problématique, tant que ce capital est utilisé pour produire une autre forme de capital. Ils partent donc de l'hypothèse que le capital naturel est substituable par d'autres capitaux, notamment financier et technologique. Ces capitaux peuvent, selon eux, être utilisés pour remplacer des ressources naturelles disparues ou remédier à des dégradations de certains éléments naturels. L'hypothèse de la substituabilité est rejetée par les partisans de la soutenabilité forte, qui estiment que le capital naturel est irremplaçable par d'autres capitaux. Selon eux, il faut donc préserver ce capital en intégralité pour les générations futures et ne pas utiliser plus de services écologiques que la nature est capable de régénérer (Boutaud & Gondran 2009, p.18).

William Rees et Mathis Wackernagel, les concepteurs de l'EE, défendent la soutenabilité forte, parce qu'ils considèrent que le capital naturel reste souvent une condition préalable au capital manufacturé et que la technologie et le capital manufacturé ne pourraient pas remplacer le capital naturel fournissant les services de support à la vie (par exemple la protection contre les rayonnements UV, la biodiversité, la filtration de l'eau, la stabilisation du climat) dans un futur prévisible. Vu que l'état actuel des stocks en capital naturel ne permettra déjà pas une stabilité écologique à long terme, ils considèrent que la soutenabilité forte est une condition nécessaire pour un véritable développement durable (Wackernagel & Rees 1996, pp.36-37). Néanmoins l'EE se positionne de façon relativement neutre dans ce débat: qu'on défende la soutenabilité faible ou forte, mesurer le capital naturel utilisé et disponible reste une nécessité préalable (Boutaud & Gondran 2009, p.18).

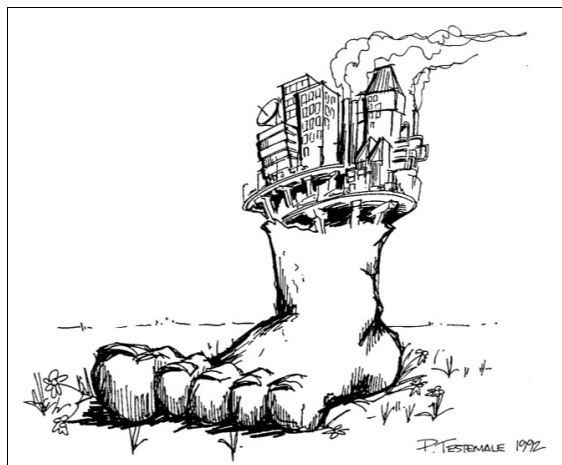
L'Empreinte écologique comme indicateur innovateur

Pour mesurer la soutenabilité, il faut donc quantifier et comparer l'offre et la demande des services issus de la nature, ou, autrement dit, le capital naturel utilisé par l'homme et le capital naturel disponible sur terre. En élaborant la méthode de l'EE au début des années 90, William Rees et Mathis Wackernagel cherchaient à créer un outil qui permette cette comparaison. Ils optaient pour une quantification physique du capital naturel utilisé par l'homme (l'EE au sens strict) et le capital naturel disponible sur terre (la biocapacité). Ils cherchaient ainsi à développer un outil visuel et facilement compréhensible, susceptible d'aider les preneurs de décisions à mieux appréhender les enjeux de la soutenabilité (Boutaud & Gondran 2009, p.39). Cet outil est d'autant plus important que l'emplacement écologique des établissements humains ne correspond plus à l'emplacement géographique. La survie et la croissance des villes modernes et des régions industrialisées dépendent des services écologiques² d'un très grand arrière-pays de plus en plus mondialisé, ce qui obscurcit fortement la vue sur l'offre et la demande réelle en capital naturel (Wackernagel & Rees 1996, p.29). En plus,

2 Ces services comprennent des services d'approvisionnement (par exemple nourriture, bois de construction), des services de régulation (par exemple régulation du climat, pollinisation des cultures), des services de soutien (par exemple photosynthèse, formation des sols) et des services culturels (par exemple expériences récréatives et esthétiques) (Pollard et al. 2010, p.10).

les limites écologiques peuvent être dépassées pendant un certain temps sans conséquences directes, à cause de l'inertie des réactions naturelles. Certains craignent néanmoins qu'une telle situation, même si elle reste inaperçue, puisse mener à l'effondrement soudain des écosystèmes. Les effets retardés d'une gestion insoutenable de la terre et la difficulté de valorisation financière des services écologiques évitent un feed-back adéquat des marchés ou des politiques. Selon ses concepteurs, l'EE permet ce feed-back en démontrant clairement le dépassement des limites écologiques (Wackernagel & Monfreda 2004, pp.1-2).

Figure 1: L'Empreinte écologique



Source : Wackernagel & Yount 1998, p.515

En choisissant une mesure physique, Wackernagel et Rees visaient à inclure la réalité biophysique et à remédier ainsi à certaines faiblesses des modèles de croissance et de développement durable conventionnels. En effet, ces théories estiment notamment que toute limitation en termes de ressources peut être éliminée par le commerce. Elles considèrent également que les facteurs de production (travail, capital, information...) sont des substituts parfaits l'un de l'autre et qu'une utilisation plus intensive d'un de ces facteurs entraîne nécessairement une croissance en productivité. Les critiques de Wackernagel et Rees relèvent du fait que ces théories négligent « l'infrastructure biophysique » et la notion de temps qui est propre aux processus écologiques. Elles considèrent également que la capacité de charge de la terre est infiniment extensible (Wackernagel & Rees 1996, pp.40-41).

Wackernagel et Rees considèrent, en effet, que les analyses monétaires présentent des faiblesses importantes pour évaluer la soutenabilité ou pour désigner des limitations en termes de capital naturel. Ils avertissent que le prix est un indicateur trompeur pour signaler la pénurie de ressources ou l'épuisement du capital naturel. Premièrement, une interprétation monétaire de l'exigence du capital naturel constant peut masquer des stocks physiques décroissants. Certains économistes estiment, par exemple, que l'exigence du capital naturel constant est satisfaite si la valeur monétaire ou les revenus obtenus grâce à ce capital restent plus ou moins constants. La rareté d'une ressource naturelle particulière peut néanmoins induire une augmentation du prix,

qui pourrait mener à une valeur totale ou un revenu constant, malgré le fait que le stock physique de ce capital naturel soit en déclin. De plus, le prix ne mesure pas la quantité du stock ou la fragilité d'un système, mais n'exprime que la rareté à court terme d'un produit sur le marché. Ainsi, les fluctuations des marchés peuvent influencer les prix, tandis que la valeur écologique ou l'intégrité du capital naturel reste inchangée.

Une deuxième critique concerne le fait que les analyses monétaires présentent des biais pour le futur, à cause de l'actualisation. Les générations futures auront besoin du même montant de capital naturel support à la vie³ par personne que la notre, indépendamment de la valeur monétaire actualisée actuelle de ce capital. Néanmoins, les bénéfices à court terme risquent de dépasser la valeur actualisée des bénéfices futurs menant au sacrifice du capital naturel pour les besoins actuels.

Troisièmement, les valeurs monétaires ne font pas de distinction entre capital naturel substituable ou non substituable. De plus, le potentiel de croissance monétaire est en théorie illimité, ce qui obscurcit le fait qu'il pourrait y avoir des limites biophysiques à la croissance économique.

Finalement, il n'existe pas de marché pour de nombreux capitaux naturels fournissant des services de support à la vie, comme la stabilité climatique, la couche d'ozone, la fixation d'azote, ... (Wackernagel & Rees 1996, pp.42-47).

Par conséquent, Wackernagel et Rees estiment que, pour le capital naturel renouvelable, des stocks constants ne peuvent qu'être évalués d'une façon fiable par les stocks physiques. Wackernagel et al. estiment que la surface bioproductive est un bon proxy pour le capital naturel et pour beaucoup de flux de ressources et de services écologiques vitaux essentiels qu'il fournit. Effectivement, la surface de terre reflète de façon très compréhensible le caractère fini du globe terrestre. En tenant compte des différences de productivité entre catégories d'écosystèmes, la surface calculée reflète le potentiel photosynthétique disponible pour la production de biomasse. En tenant compte des différences entre régions, elle reflète aussi la qualité de la terre, comme indicateur de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes liés et leur potentiel de productivité sur le long terme. Le capital non renouvelable ne peut qu'être utilisé de façon durable si, en contrepartie, un stock de capital biophysique avec une valeur énergétique équivalente est accumulé (Wackernagel & Rees 1997, p.6; Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.377).

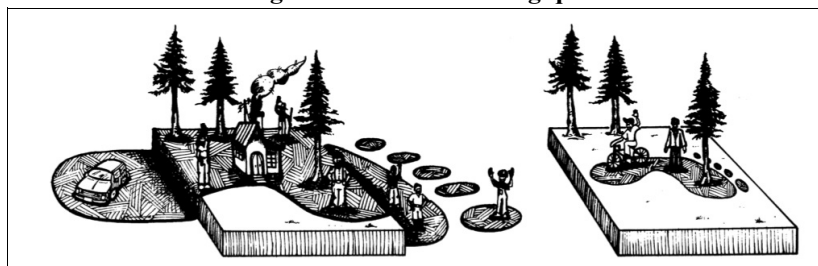
La capacité de charge est une autre notion qui survient souvent dans les débats sur la soutenabilité. Elle exprime la population maximale d'une certaine espèce qui peut être supportée infiniment par un habitat particulier, sans atteindre à titre définitif la productivité de cet habitat. Appliquée à l'être humain, cette notion pose plusieurs problèmes : premièrement, la charge écologique d'une population humaine dépend fortement du revenu moyen, des attentes matérielles, des technologies disponibles... Deuxièmement, la mondialisation

3 Le capital naturel support à la vie est défini comme étant le stock de ressources écologiques qui fournissent des biens et des services de manière durable. Les principales fonctions de ce capital comprennent la production de ressources, l'assimilation des déchets et les services de support à la vie.

de l'économie implique qu'une population donnée a accès aux ressources lointaines. L'EE surmonte ces problèmes en inversant le ratio : l'EE mesure la terre nécessaire pour la production de l'énergie et des biens consommés par une population et pour l'assimilation des déchets produits par cette population. La taille de cette terre ne coïncide pas nécessairement avec la taille de la terre où la population vit réellement (Wackernagel & Rees 1996, pp.48-51).

L'EE permet par conséquent de calculer dans quelle mesure une population dépasse la biocapacité locale. Ce dépassement est nommé « déficit écologique ». Le déficit écologique est comblé, par le biais du commerce, par la biocapacité d'ailleurs dans le monde. L'EE facilite également la comparaison entre régions et démontre ainsi l'effet du niveau de vie et des technologies sur l'impact écologique d'une population. Finalement, l'EE rend possible de calculer dans quelle mesure l'EE de l'humanité dépasse la biocapacité mondiale. Ce dépassement est nommé « *overshoot* » et cause l'épuisement du capital naturel et la dégradation des services qui assurent le maintien de la vie (Wackernagel & Rees 1996, pp.53-55).

Figure 2: Le déficit écologique



Source : Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.385

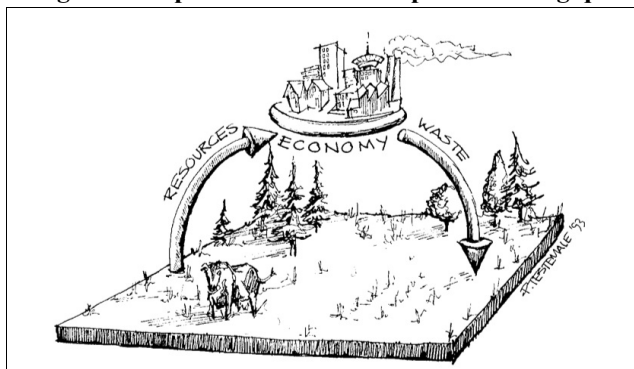
1.2 Opérationnalisation et hypothèses de l'Empreinte écologique

Un enjeu crucial à la construction de l'EE est la difficulté d'opérationnaliser le concept du 'capital naturel'. Dans la méthode de l'EE il est considéré comme la quantité de capacité de l'écosystème nécessaire pour répondre aux besoins en ressources et pour assimiler les déchets de l'économie humaine, qui est régénérative. Les éléments non renouvelables, comme par exemple les minerais issus de la lithosphère ou une partie de l'eau de l'hydrosphère, ne sont pas pris en compte. L'EE concerne donc principalement la biosphère (les éléments du capital naturel qui peuvent se régénérer par le biais plus ou moins direct de la photosynthèse) (Boutaud & Gondran 2009, pp.42-45).

Ainsi l'EE exprime « *la capacité régénérative de la biosphère nécessaire au fonctionnement de l'économie humaine pendant une année et pour une population donnée* ». Il est important de noter ici que l'EE concerne la consommation d'un pays et non sa production. C'est donc uniquement la demande finale qui est prise en

compte. En d'autres mots: la capacité régénérative de la biosphère liée aux produits d'exportation est attribué aux pays importateurs de ces produits et non aux producteurs (Boutaud & Gondran 2009, p.47).

Figure 3: Représentation de l'Empreinte écologique



Source : Wackernagel & Rees 1997, p.6

La construction de l'indice de l'EE se fonde sur six hypothèses fondamentales:

1. *Les ressources consommées et les déchets générés par les économies nationales sont identifiables, ils font l'objet d'un recensement exhaustif et peuvent être exprimés en unités de mesure physiques;*

Il est important de souligner le fait que, comme pour tout indicateur, la précision de l'EE dépend fortement de la qualité et de l'exhaustivité des informations disponibles dans les banques de données nationales et internationales (Boutaud & Gondran 2009, pp.46-49).

2. *Les ressources consommées correspondent à des surfaces « bioproductives »;*

Pour pouvoir agréger les données sur les ressources consommées (quantités d'énergie, de viande, de bois...) et les déchets générés (émissions de CO₂) par cette consommation, il faut procéder à un processus de normalisation. Cette normalisation permet d'exprimer les données en une unité de mesure commune pour pouvoir les additionner. Vu que la plupart des ressources naturelles nécessaires pour répondre aux besoins de l'économie humaine se régénèrent par le biais plus ou moins direct de la photosynthèse et que ce processus est lié directement à la quantité de surface disponible sur terre pour capter la lumière du soleil, il est logique d'utiliser la surface comme unité de mesure commune. Les surfaces de sol ou de mer dotées de la capacité de photosynthèse sont ainsi appelées surfaces biologiquement productives ou « bioproductives ». Il s'agit donc de calculer pour chaque type de consommation ou de production de déchets la surface bioproductive qu'il convient de mobiliser pour produire ce service ou assimiler ces déchets, sans entamer le capital naturel. Ce calcul prend évidemment en compte les technologies et les méthodes de production et de gestion de ressources en vigueur durant la période concernée (Boutaud & Gondran 2009, pp.49-50).

3. *Les différentes surfaces bioproductives peuvent être exprimées sous la forme d'une surface de productivité moyenne, l'hectare global;*

Afin de pouvoir additionner et comparer les différentes surfaces bioproductives, il faut tenir compte du fait que ces surfaces ont des degrés de « productivité biologique »⁴ très hétérogènes. Il faut donc une étape de standardisation qui permette de donner à ces surfaces une valeur de productivité égale. En pondérant chaque surface en fonction de sa productivité de biomasse utilisable, on obtient une surface standardisée ayant une productivité moyenne mondiale, qu'on appelle 'hectares globaux' (ha_g) (Boutaud & Gondran 2009, pp.50-51).

4. *Les hectares globaux peuvent être agrégés de manière mutuellement exclusive;*

Finalement il faut tenir compte du fait que certaines surfaces peuvent avoir plusieurs fonctions. Afin d'éviter de les comptabiliser plusieurs fois et ainsi surestimer la demande globale, on distingue les fonctions productives 'primaires' et 'secondaires'. Dans l'EE seulement les fonctions 'primaires' sont comptabilisées (Boutaud & Gondran 2009, p.52).

5. *Empreinte écologique et biocapacité peuvent être comparées.*

Les étapes de normalisation et de standardisation permettent de comparer la demande humaine (l'EE) et les capacités de production (la biocapacité), toutes les deux exprimées en hectares globaux (Boutaud & Gondran 2009, p.53).

6. *L'Empreinte écologique peut dépasser la biocapacité, ce qui implique que les activités humaines mettent une pression sur le capital naturel qui dépasse ses capacités régénératives.*

Ce déficit écologique est soit compensé par des importations, soit par une sur-utilisation des ressources domestiques, menant à l'épuisement du capital naturel (Wackernagel & Monfreda 2004, p.3).

L'EE part du principe de sous-estimation systématique des impacts : elle sous-estime de façon systématique l'impact humain et surestime la biocapacité disponible. En cas de doutes, les estimations les plus optimistes de la biocapacité et les plus modestes de l'EE sont retenues : il s'agit des données gouvernementales, si disponibles, ou des données acceptées par la communauté scientifique, comme les données du GIEC (Wackernagel & Rees 1996, p.52).

4 Il s'agit de la quantité de matière vivante, ou biomasse, formée pendant une année sur une surface déterminée (Boutaud & Gondran 2009, p.50).

1.3 Méthode de calcul de l'Empreinte écologique dans les Comptes Nationaux d'Empreinte

La méthode de calcul de l'EE a beaucoup évolué depuis sa conception. En 2003, le Global Footprint Network (GFN) a été créé pour coordonner les recherches et les calculs. Le GFN a établi « les Comptes Nationaux d'Empreinte » (*National Footprint Accounts*), des calculs de l'EE pour 150 pays. Les CNE sont calculés pour l'année 1961 jusqu'à l'année 2007 (la dernière année dont les données sont disponibles actuellement). Les calculs des Comptes Nationaux d'Empreinte (CNE) sont surtout fondés sur des bases de données internationales publiées par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organisation of the United Nations, FAO), la division statistique des Nations Unies et l'Agence internationale de l'énergie (International Energy Agency, IEA) (Ewing, Reed, et al. 2010, p.2).

Calcul de la biocapacité

La biocapacité est « *la capacité des écosystèmes à produire de la matière biologique utile et à absorber les déchets générés par les sociétés humaines, compte tenu des systèmes de gestion et des techniques d'extraction actuels* ». Il s'agit donc du potentiel maximum de récolte atteignable sur un type de sol donné, laissant de côté la partie de la capacité régénérative qui n'est pas utilisable à des fins humaines (Boutaud & Gondran 2009, p.55; GFN 2011).

Pour faciliter le calcul, chaque surface de sol est classée dans un des cinq types de sol suivants (« Land Use Types »): pâturages, forêts, terres cultivées, surfaces de pêche, terrains bâtis (Wackernagel et al. 2001, p.1; GFN 2009, p.13).

Pour chaque type de sol la biocapacité est calculée comme suit :

$$B = A * FR * FEQ$$

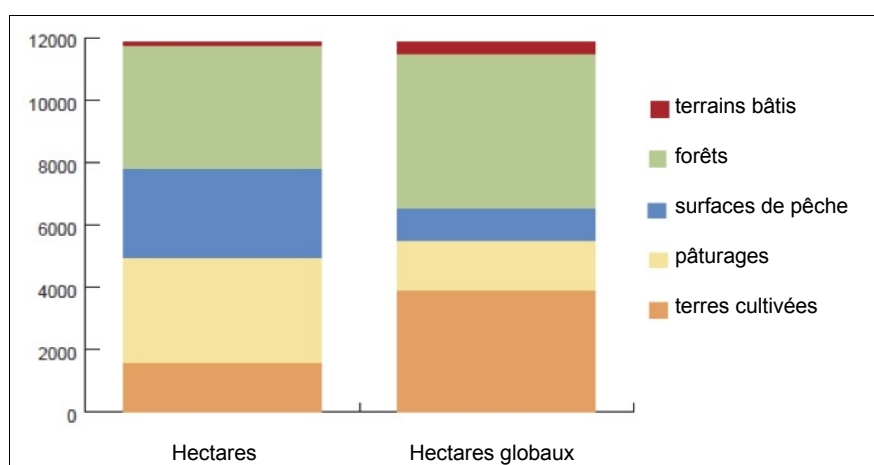
Où A est la surface disponible pour le type de sol donné. FR et FEQ représentent respectivement le facteur de rendement du pays, de l'année et du type de sol en question et le facteur d'équivalence. En multipliant la surface disponible pour le type de sol donné par le facteur de rendement et le facteur d'équivalence, on obtient la surface disponible en hectares globaux (Ewing, Reed, et al. 2010, p.5).

Le facteur de rendement exprime les différences entre la productivité moyenne nationale et la productivité moyenne mondiale d'un type de sol. C'est le rapport, pour une année donnée, entre la productivité moyenne d'un type de sol dans un pays donné et la productivité mondiale moyenne. Le facteur de rendement peut largement varier selon les régions et selon les années. Il ne tient pas seulement compte de la productivité des sols, mais aussi des technologies et des méthodes d'exploitation utilisées dans le pays en question (Boutaud

& Gondran 2009, pp.57-64).

Le facteur d'équivalence quant à lui reflète les variations de productivité entre les différents types de sol. C'est le rapport entre la moyenne mondiale du potentiel maximum de productivité d'un type de sol et le potentiel moyen de productivité de l'ensemble des types de sol productifs de la terre (Boutaud & Gondran 2009, pp.57-60; Ewing, Reed, et al. 2010, p.3). Au niveau mondial, il suffit de multiplier les hectares de surface avec le facteur d'équivalence pour obtenir les hectares globaux pour chaque type de sol. Le graphique ci-dessous représente les surfaces relatives des types de surfaces disponibles au niveau mondial en hectares et en hectares globaux (Ewing, Reed, et al. 2010, p.8).

Graphique 1: Surfaces mondiales par type de sol en ha et en ha_g en 2007 (en millions)



Source : Ewing et al. 2010, p.8

Calcul de l'Empreinte écologique

« L'Empreinte écologique mesure la surface biologiquement productive (terrestre et aquatique) dont une personne, une population ou une activité a besoin pour produire toutes les ressources consommées et pour absorber tous les déchets produits, compte tenu des technologies disponibles et des pratiques de gestion mise en œuvre » (GFN 2011).

Le calcul de l'EE se fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à calculer l'EE de la production primaire. L'EE prend en compte les biens et les services consommés dans un pays et non ceux qui y sont produits. La deuxième étape consiste alors à calculer l'EE liée à la consommation nette. Il s'agit alors de soustraire l'EE incorporée dans les exportations et d'additionner l'EE incorporée dans les importations. L'EE est calculée sur base des productions primaires. La dernière étape implique alors la détermination de l'EE incorporée dans les produits dérivés (Boutaud & Gondran 2009, pp.65-66; Ewing, Reed, et al. 2010, pp.3-5).

Le calcul de l'Empreinte écologique de la production primaire

La production constitue la première demande en biocapacité. L'EE de la production primaire est calculée comme suit :

$$EE_p = (P / R_n) * FR * FEQ$$

Où EE_p représente l'EE de la production primaire, P représente la quantité du produit récolté ou le dioxyde de carbone émis et R_n est la productivité moyenne nationale pour ce produit (ou sa capacité de séquestration de carbone). FR et FEQ représentent respectivement le facteur de rendement et le facteur d'équivalence (Ewing, Reed, et al. 2010, p.3).

Le calcul de l'Empreinte écologique de la consommation nette

Chaque processus de production dépend de l'utilisation de la biocapacité pour fournir les matériaux entrants et pour éliminer les déchets. Chaque produit contient alors une EE incorporée. Les flux de commerce international constituent alors des flux de demandes incorporés de la biocapacité. L'EE de la consommation nette est alors calculée comme suit :

$$EE_{cons} = EE_p + EE_i - EE_e$$

Où EE_{cons} représente l'Empreinte écologique de la consommation nette, EE_p l'Empreinte écologique de la production primaire et EE_i et EE_e l'Empreinte écologique des importations et des exportations, respectivement. Si on parle de l'Empreinte écologique sans détailler plus, il s'agit de l'Empreinte écologique de la consommation nette. L'énergie grise, l'énergie nécessaire à la production, la fabrication, l'utilisation et l'élimination des biens importés, est aussi prise en compte. Ainsi on évite d'attribuer cette énergie au pays producteur au lieu du pays consommateur. L'énergie grise est déterminée à partir de la banque de données sur l'énergie grise du Stockholm Environment Institute ou en calculant la moyenne des données d'intensité énergétique issues de nombreuses études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Par faute de données suffisantes, les produits ont la même quantité d'énergie incorporée quel que soit leur pays de production. L'énergie est ensuite traduite en émissions de CO_2 . Pour les exportations, on se base sur le mix énergétique du pays producteur pour calculer cette conversion. Pour les importations, on utilise une moyenne mondiale (Boutaud & Gondran 2009, p.67).

Le calcul de l'Empreinte écologique des produits dérivés

Afin d'éviter les problèmes de double comptage, l'EE est calculée sur base des données de la FAO sur les flux en ressources primaires. Les importations et exportations de ressources secondaires sont alors converties en ressources primaires incorporées (Boutaud & Gondran 2009, p.67).

La première étape consiste à calculer le rendement des produits dérivés. Ce rendement est calculé comme suit :

$$R_d = R_p * EXTR_d$$

Où R_d et R_p sont le rendement du produit dérivé et du produit primaire respectivement. $EXTR_d$ est le taux d'extraction du produit dérivé. Souvent ce taux est simplement égal au rapport des masses du produit dérivé par rapport au produit primaire nécessaire à sa production. Ce rapport est aussi dénommé facteur de conversion technique (FCT_d). Parfois, plusieurs produits dérivés sont créés simultanément du même produit primaire. Dans ce cas, l'addition des produits primaires équivalents aux produits dérivés mènerait au double comptage. Pour résoudre ce problème, l'EE est partagée entre les produits simultanément dérivés. Le taux d'extraction est alors calculé comme suit :

$$EXTR_d = FCT_d / FAE_d$$

FAE_d est le facteur d'allocation d'Empreinte. Le facteur d'allocation attribue l'EE du produit primaire aux produits simultanément dérivés, selon le prix pondéré pour le FCT. Le prix des produits dérivés exprime leur contribution relative à l'intérêt à cultiver le produit primaire. Le facteur d'allocation d'Empreinte est alors calculé comme suit :

$$FAE_d = FCT_d V_d / \sum FCT_i V_i$$

Où V_i est le prix sur le marché pour chaque produit simultanément dérivé. Pour une chaîne de production qui ne génère qu'un produit dérivé, le FAE_d sera égal à 1 et $EXTR_d$ est alors égal à FCT_d (Ewing, Reed, et al. 2010, pp.4-5).

Calcul du facteur de rendement et du facteur d'équivalence

Un hectare global (ha_g) est une unité de surface à productivité moyenne mondiale. L'expression des Empreintes écologiques et des biocapacités en hectares globaux permet la comparaison entre types de sol et entre pays. Pour convertir une quantité de surface en ha_g , elle est multipliée par le facteur de rendement, pour tenir compte des différences de productivité moyenne nationales et mondiales pour un type de sol donné. Puis elle est multipliée par le facteur d'équivalence afin d'exprimer les différences en productivité entre différents types de sol (Ewing, Reed, et al. 2010, p.5).

Calcul du facteur de rendement

Le facteur de rendement est le rapport entre productivité moyenne nationale et mondiale d'un type de sol. Il est calculé en termes de produits utilisables disponibles par année. Pour un type de sol donné S, le facteur de rendement FR_s est calculé comme suit :

$$FR_s = \sum_{i \in U} A_{N,i} / \sum_{i \in U} A_{W,i}$$

Où U est l'ensemble de tous les produits primaires utilisables récoltés sur un type de sol donné. $A_{W,i}$ et $A_{N,i}$ sont les surfaces nécessaires à fournir la quantité annuelle disponible dans un pays du produit i, respectivement au rendement mondial et national. Les surfaces sont calculées comme suit :

$$A_{N,i} = P_i / R_n \text{ et } A_{W,i} = P_i / R_w$$

Où P_i est la croissance moyenne annuelle nationale du produit i et R_n et R_w sont respectivement les rendements nationaux et mondiaux. $A_{N,i}$ est alors la surface nécessaire à produire i dans un pays donné, tandis que $A_{W,i}$ représente la surface équivalente de terre moyenne mondiale à cultiver i.

A l'exception des terres cultivées, tous les autres types de sol ne produisent qu'un seul produit primaire, comme le bois pour les forêts ou de l'herbe pour les pâturages. Pour ces types de sol, le facteur de rendement peut alors être simplifié :

$$FR_s = R_n / R_w$$

Vu la difficulté à attribuer un rendement aux terrains bâtis, le facteur de rendement des terres cultivées est appliqué. Les terrains bâtis sont alors supposés être construits sur des terres agricoles productives. Pour les surfaces inondées pour les réservoirs hydroélectriques, une productivité moyenne mondiale est appliquée. En effet, le manque de données mondiales sur ce sujet ne permet pas d'estimations plus précises. Le même problème se pose pour les systèmes aquatiques continentaux, auxquels un facteur de rendement de 1 est assigné. Le facteur de rendement pour l'Empreinte carbone (EE_c) est considéré être égal au facteur de rendement de la forêt. A nouveau, la disponibilité limitée de données sur la capacité de séquestration d'autres types de sol ne permet pas plus de précision (Ewing, Reed, et al. 2010, pp.5-6).

Calcul du facteur d'équivalence

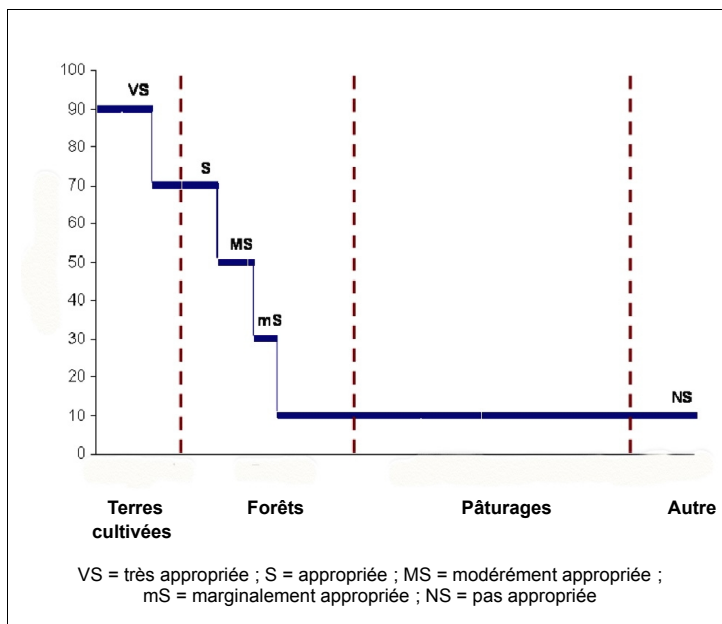
Le facteur d'équivalence cherche à pondérer différents types de sol en termes de capacité à produire des ressources utiles pour l'homme. Par conséquent, le facteur d'équivalence ne tient pas seulement compte de la quantité de biomasse produite, mais également de la valeur que cette biomasse a pour l'homme. Le facteur d'équivalence varie alors en fonction de l'année et en fonction du type de sol (Ewing, Reed, et al. 2010, p.6).

Le facteur d'équivalence est calculé à partir du 'Suitability Index of Global Agro-Ecological Zones (GAEZ)' de la FAO. Cet index établit, au niveau mondial, pour chaque zone recensée un 'indice d'appropriation' qui évalue le potentiel de productivité en fonction du sol, du climat, des périodes de croissance des végétaux... (Boutaud & Gondran 2009, pp.57-60). Les zones sont réparties en cinq catégories, selon leur potentiel de productivité calculé : Très appropriée = 0,9 ; Appropriée = 0,7 ; Modérément appropriée = 0,5 ; Marginalement appropriée = 0,3 ; Pas appropriée = 0,1.

Cette classification est ensuite combinée avec les données sur les surfaces réelles en terres cultivées, forêts et pâturages. Le calcul des facteurs d'équivalence suppose que dans chaque pays, les terres les plus appropriées soient utilisées comme terres cultivées. Les terres les plus appropriées restantes sont ensuite attribuées aux forêts et les terres les moins appropriées sont destinées aux pâturages. Les facteurs d'équivalence sont ensuite calculés comme le rapport entre l'indice d'appropriation moyenne mondiale pour un type de sol donné et l'indice d'appropriation moyenne mondiale pour tous les types de sol.

Le graphique ci-dessous représente de façon schématique le mode de calcul des facteurs d'équivalence. La longueur de l'axe horizontal représente le nombre total d'hectares de surface bioproductive. Les lignes verticales pointillées divisent cette longueur totale en trois types de sol pour lesquels les facteurs d'équivalence sont calculés : les terres cultivées, les forêts et les pâturages. La longueur de chaque barre dans le graphique représente la quantité de terre disponible pour chaque indice d'appropriation. La position des barres reflète le score d'appropriation pour cet indice d'appropriation, entre 0,1 et 0,9 (Ewing, Reed, et al. 2010, pp.6-7).

Graphique 2: Indice d'appropriation et classification des terres



Source : Ewing et al. 2010, p.7

Pour les mêmes raisons que citées pour le facteur de rendement, le facteur d'équivalence des terrains bâtis est égal au facteur d'équivalence des terres cultivées et celui de l'Empreinte carbone est égal au facteur d'équivalence des forêts. Le facteur d'équivalence des surfaces inondées pour les réservoirs hydroélectriques est fixé à 1, vu l'hypothèse antérieure qu'ils sont construits sur des terres moyennes mondiales. Le facteur d'équivalence des surfaces marines est calculé en sorte qu'un ha_g de surface marine peut produire la même quantité de calories de saumon qu'un ha_g de surface de terre peut produire de calories de boeuf. Finalement le facteur d'équivalence pour les systèmes aquatiques continentaux est fixé au même nombre que celui des surfaces marines (Ewing, Reed, et al. 2010, pp.7-8).

Les différents types de sol

La biocapacité et l'EE sont calculées pour cinq types de sol : les terres cultivées, les pâturages, les forêts, les surfaces de pêche et les terrains bâtis. L'EE des émissions de CO₂ est calculée comme la surface nécessaire à séquestrer le CO₂. Cette surface est appelée 'Empreinte carbone' ou 'espace CO₂'. La méthode de calcul de l'EE et de la biocapacité par type de sol sont reprises de façon plus détaillée dans l'annexe 1 (p. 137).

Les analyses d'Entrées-Sorties (E/S) et sur base des « Product Land Use Matrix »

Les premières éditions des CNE ne permettaient pas de répartir l'EE sur différents secteurs économiques, ni par catégorie de demande finale ou par activité de consommation détaillée. Ceci constituait une faiblesse importante pour l'EE comme outil d'élaboration des politiques. Pour améliorer sa pertinence politique et la comparabilité des résultats entre pays et régions, une méthode plus adéquate a été élaborée, en combinant les analyses d'Entrées – Sorties (E/S) environnementales et l'EE (Wiedmann et al. 2006, pp.29-30). Une analyse d'E/S est basée sur un ensemble de comptes économiques désagrégés par secteur. Ces comptes identifient séparément les entrées pour chaque secteur industriel et les utilisations subséquentes des sorties de ces secteurs. Ainsi, l'interdépendance entre différentes activités économiques est démontrée. Les tableaux d'E/S sont le plus souvent exprimés en flux monétaires (Turner et al. 2007, p.38). L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet de relier le niveau d'activité économique et l'impact environnemental d'une population, ainsi que le niveau de demande finale et les processus de production intensive. Elle permet également d'étudier en profondeur les impacts écologiques nets du commerce et la dépendance d'un pays vis-à-vis les importations pour soutenir sa consommation (Bicknell et al. 1998, p.11).

Pour comptabiliser l'EE incorporée dans les produits échangés dans le commerce international, plusieurs méthodes ont été développées. Les deux méthodes les plus importantes sont la méthode sur base d'une matrice d'utilisation des sols pour les produits⁵ (*Product Land Use Matrix (PLUM)*) et la méthode sur base

5 Cette matrice indique pour chaque pays, pour une année donnée et par catégorie de produits, un coefficient de rendement ; qui exprime combien d'hectares des quatre types de sols majeurs (terres cultivées, forêts, pâturages, surfaces de pêche) sont nécessaires pour produire 1 tonne de ce produit (Moran et al. 2009, p.1941).

d'un modèle d'E/S multi-régionaux (« *Multi Regional Input-Output Model* » (MRIO)) (D. D. Moran et al. 2009, p.1941).

La méthode sur base du PLUM se base sur les flux physiques et est actuellement utilisée pour les calculs des CNE. Le PLUM contient, pour chaque catégorie de produits, un facteur de rendement qui exprime combien d'hectares de chaque type de sol sont nécessaires pour la production d'une tonne de ce produit. Des facteurs de conversion sont utilisés pour convertir les produits secondaires en produits primaires. Puis le poids des produits échangés est multiplié par les facteurs de conversion et de rendement appropriés (Wiedmann 2009, p.1976).

La méthode sur base du MRIO établit un modèle d'E/S qui permet de relier non seulement les flux monétaires entre secteurs, mais également les flux monétaires entre différents secteurs dans différents régions et pays (Turner et al. 2007, p.40).

Approche par composants et approche par agrégation

Il existe deux méthodes de calcul de l'EE: l'approche par composants (*Components Based Approach*) et la méthode par agrégation ou « macro » (*Compound Based Approach*).

L'approche par composants identifie d'abord tous les biens et services consommés par une population donnée. Ensuite, la quantité de flux biophysiques nécessaire à leur production est déterminée sur base de nombreuses études d'analyse de cycle de vie (ACV) des produits. L'approche « macro » utilise, quant à elle, des données statistiques nationales agrégées (Boutaud & Gondran 2009, p.46).

L'approche par composants permet une analyse très détaillée, mais la précision du résultat final dépend fortement de l'exhaustivité de la liste des composants et de la fiabilité de l'étude ACV pour chaque composante. Actuellement, les études ACV sont encore trop peu nombreuses et les généralisations sur base d'études ACV sont très difficiles, étant donné que les méthodes de calcul utilisées diffèrent souvent et que les différents procédés de fabrication d'un produit peuvent avoir des impacts très variés (Boutaud & Gondran 2009, p.46; Wackernagel & Monfreda 2004, p.2).

L'avantage de l'approche « macro » est que la méthode est à la fois plus simple et plus exhaustive, vu que les données nationales permettent de connaître la quantité de ressources consommée dans un pays, sans avoir à connaître le détail de chaque utilisation finale et qu'ils concernent aussi bien la consommation directe qu'indirecte. Un autre avantage est que les calculs sont facilement accessibles et reproductibles, puisqu'ils se basent sur des données publiques des Nations Unies. De plus, il s'agit des bases de données statistiques déjà disponibles, mais interprétées sous un angle écologique (Boutaud & Gondran 2009, p.46; Wackernagel & Monfreda 2004, p.3).

1.4 Evolution continue de l'Empreinte écologique

Depuis sa conception, l'EE n'est pas du tout resté inchangée. En 1999, les chercheurs néerlandais van den Bergh et Verbruggen ont publié un article dans la revue *Ecological Economics* sur les limites de la méthode de calcul de l'EE et sa pertinence (van den Bergh & Verbruggen 1999). Cet article a suscité un vif débat entre chercheurs et, en 2000, la revue a consacré une tribune à l'EE, regroupant douze contributions de différents auteurs (*Ecological Economics*, 32(3)). Dans l'espace francophone, cette discussion sur les limites de l'EE est passé largement inaperçu (La Revue Durable 2008, p.64). Huit ans plus tard, Frédéric Paul Piguet et ses collègues, tous liés à l'Université de Lausanne en Suisse, ont publié un article très critique dans la revue *Futuribles* et ouvraient ainsi le débat francophone sur l'EE (Piguet et al. 2007). La Revue Durable a consacré alors un mini dossier pour faire le point sur les principales critiques et a publié une partie des réponses de Mathis Wackernagel et al. (La Revue Durable 2008).

A part les débats entre chercheurs, le monde politique a également contribué aux discussions autour de l'EE. Plusieurs pays, entre autres la Suisse (von Stokar, Steinemann & Ruëgge 2006), la France (David et al. 2010) et le Luxembourg (Courtonne & Mathias 2010) ont mené des études pour valider les CNE sur base des statistiques nationales. En 2008, la Belgique a également effectué cet exercice (Janssen 2008) et en 2010, il a été répété au niveau de la Flandre (Bruers & Verbeeck 2010).

Finalement plusieurs rapports ont été établis pour déterminer si l'EE pourrait être utilisée comme indicateur de la soutenabilité pour orienter l'élaboration des politiques, notamment pour l'Allemagne, la France et au sein de l'Union Européenne (Giljum et al. 2007; ECOTEC - UK 2001; Le Clézio 2009).

Les adeptes de l'EE saluent les discussions, qui leur permettent de préciser leur démarche et d'affiner leurs calculs. D'ailleurs, en 2003 le Global Footprint Network (GFN) a été créé, un institut de recherche qui regroupe 90 organisations partenaires et qui vise à créer une dynamique permettant d'améliorer la méthode de calcul pour la rendre la plus robuste possible. Le GFN coordonne ainsi la recherche en soutien aux Comptes Nationaux d'EE et développe des méthodes standard. Les organisations partenaires émanent de tous les continents et font partie du milieu académique, ainsi que des services publics, du monde des affaires et de la société civile. Des représentants de ces organisations constituent le Comité des comptes nationaux, qui a pour rôle de suggérer des changements de méthode au coeur des comptes nationaux de l'Empreinte et de considérer toute modification proposée par des intervenants externes. En second lieu, le GFN collabore avec des gouvernements et des consultants externes pour examiner la méthode de comptabilité pour leur pays. Les résultats de ces travaux sont utilisés pour améliorer la qualité des comptes de l'EE de tous les pays. Tout changement dans les méthodes est en plus public et ouvert aux commentaires avant sa mise en oeuvre (La Revue Durable 2008, pp.64-68; GFN 2010a). Finalement des procédures sont mises en place pour tester la cohérence et la fidélité des données et pour identifier des erreurs dans les bases de données ou dans la méthode. Des valeurs manquantes ou erronées sont estimées sur base des données des années environnantes.

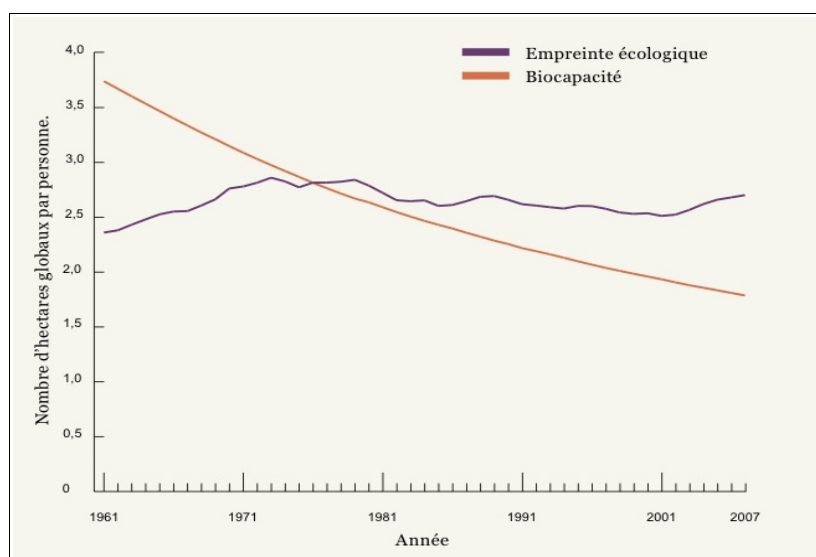
Les tests ont aussi mené à des propositions d'améliorations méthodologiques, qui ont considérablement contribué à la robustesse des calculs (Kitzes, Galli, et al. 2009; Best et al. 2008). The National Footprint Accounts Review Committee a été également fondé pour soutenir l'amélioration continue des bases scientifiques des CNE, en déterminant les changements méthodologiques et les priorités de recherche futures (Ewing, Moore, et al. 2010, pp.91, 93-95).

2 Evolution et tendances actuelles de la biocapacité et de l'Empreinte écologique

2.1 La biocapacité et l'Empreinte écologique mondiale

La terre a une surface de 51 milliards d'hectares. Selon les CNE moins d'un quart de la surface terrestre peut être considéré comme biologiquement productif. Le reste de la surface terrestre consiste en des océans profonds, est couvert par la glace ou manque de sols fertiles ou d'eau douce (Wackernagel & Monfreda 2004, p.4). La biocapacité de la terre vaut alors 11,9 milliards d'ha_g, ou 1,8 ha_g par personne. Entre 1961 et 2007, la biocapacité globale disponible en ha_g par personne a diminué, notamment à cause de la perte de productivité des milieux naturels surexploités ou pollués et la forte croissance démographique (voir Graphique 3). En effet, en 2005, la biocapacité globale disponible s'élevait encore à 13,6 milliards d'ha_g, ou 2,1 ha_g par personne (Pollard et al. 2010, pp.34, 44; WWF 2008, p.14; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.18).

Graphique 3: L'évolution de la biocapacité mondiale en ha_g par personne, 1961-2007

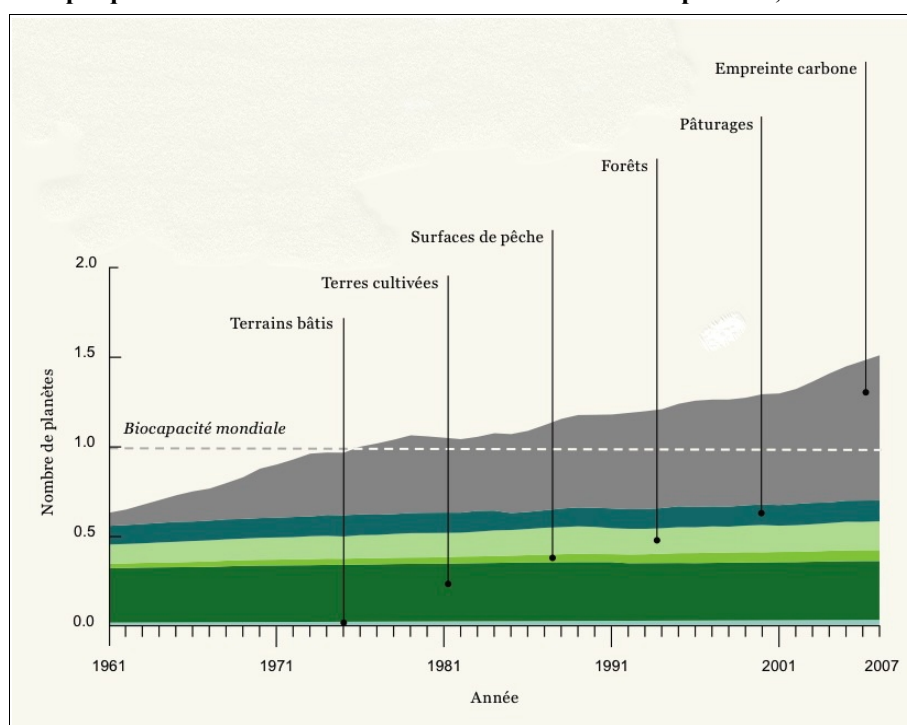


Source : Pollard et al. 2010, p.44

En 2007, l'Empreinte de l'humanité atteignait 18 milliards d'ha_g, soit 2,7 ha_g par personne. Comparé aux 1,8 ha_g de biocapacité disponible par personne, ceci implique qu'il faut une planète et demi pour régénérer toutes les ressources nécessaires à notre système économique et en absorber les émissions de CO₂ de façon durable (Pollard et al. 2010, p.34). Ce dépassement écologique mondial est dû à l'incapacité d'assimilation par la biosphère du CO₂ dégagé par la combustion des énergies fossiles. En effet, plus de la moitié de l'EE mondiale est lié à l'Empreinte énergétique, sans inclure l'énergie hydraulique. L'Empreinte carbone en constitue la majeure partie. Puis 350 millions de ha_g sont consacrés au bois-énergie (2% du total) et 536 millions de ha_g à l'Empreinte nucléaire (4% du total) (Boutaud & Gondran 2009, pp.86-87).

Entre 1961 et 2007, l'EE a été multiplié par 2,5. L'essentiel de cet augmentation est à nouveau imputable à l'Empreinte carbone, qui a été quasiment multipliée par dix au niveau mondial (voir Graphique 4) (Boutaud & Gondran 2009, p.91; Ewing, Reed, et al. 2010, p.11; Pollard et al. 2010, pp.34-39; Ewing, Moore, et al. 2010, p.1)

Graphique 4: L'évolution de l'EE mondiale en nombre de planètes, 1961-2007



Source : Pollard et al. 2010, p.34

Les demandes envers les écosystèmes de la planète varient fortement d'un pays à l'autre : les Emirats Arabes Unis ont l'Empreinte la plus importante, valant plus que 10 ha_g par personne, tandis que l'EE du Bangladesh n'atteint même pas 1 ha_g par personne (Pollard et al. 2010, pp.34-39). De tous les composants de l'EE, l'Empreinte énergie⁶ montrait les disparités les plus importantes entre les pays riches et pauvres. En 1999, les

⁶ L'Empreinte énergie repris ici comprend les énergies fossiles, la biomasse, l'énergie nucléaire et l'énergie hydroélectrique. Depuis 2008, l'Empreinte nucléaire n'est plus repris dans les Comptes Nationaux d'Empreinte.

pays à haut revenu avaient une Empreinte énergie 16 fois plus élevée que les pays à bas revenu (Loh et al. 2002, p.14). Malheureusement, l'Empreinte énergie n'était plus reprise dans les Rapports Planète Vivante plus récents, ni dans les versions de l'« Ecological Footprint Atlas », ne permettant pas d'analyse de données plus récentes.

2.2 L'Empreinte écologique de la Belgique et de la Flandre

La Direction générale Statistique et Information économique (DGSIE) du SPF Economie, P.M.E, Classes Moyennes et Energie a effectué en 2008 une comparaison entre les estimations de l'Empreinte belge du GFN et des estimations sur base des données nationales pour l'année 2003. Contrairement aux analyses faites pour la France et la Suisse, l'écart entre les estimations sur base de données internationales et nationales est important pour la Belgique. En 2010, l'a.s.b.l. Ecolife et VITO ont calculé l'EE de la Flandre pour l'année 2004 selon la méthodologie des CNE et sur base d'un modèle Entrées-Sorties (Modèle E/S) (Boutaud et al. 2010, p.20; von Stokar, Steinemann, Ruëgge, et al. 2006, p.43; David et al. 2010, p.12; Janssen 2008; Bruers & Verbeeck 2010, p.7).

Je présenterai ici les résultats pour la Belgique basé sur les estimations des CNE, portant sur les années 1961-2006 et permettant d'esquisser l'évolution de l'Empreinte. Puis je détaillerai les résultats le plus importants pour la Flandre en 2004. Dans le chapitre 'Faiblesses des CNE spécifiques pour la Belgique' (p. 47), je présenterai les analyses sur base des données statistiques Belges, portant sur l'année 2003 et sur base du modèle E/S pour la Flandre, portant sur l'année 2004. Ces résultats démontrent certaines faiblesses de la méthode de calcul des CNE, spécifiques pour la Belgique (et la Flandre).

L'évolution de l'Empreinte écologique belge sur base des Comptes Nationaux d'Empreinte

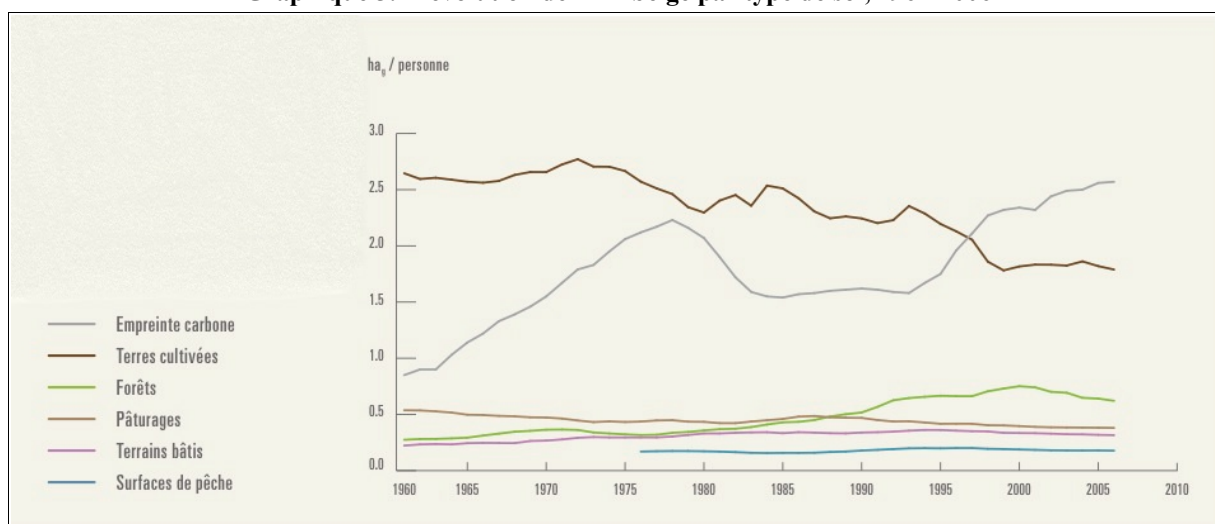
Depuis 1961 jusqu'à 2006, l'EE de la consommation de la Belgique a augmenté de 43% et celui de la production de 128%, alors que le PIB a augmenté de 267%, impliquant un découplage entre l'Empreinte et le PIB. Au cours de cette période, la croissance démographique était de 14%. La plus grande partie de l'augmentation de l'EE de la consommation est donc attribuable aux changements des modes de production et de la consommation liés à l'accroissement du niveau de vie matériel. En 2006, la consommation de la Belgique était de 59 millions de ha_g, impliquant que si chaque habitant de la planète vivait comme un Belge en 2006, il faudrait plus que trois planètes pour pouvoir répondre de façon durable aux besoins (Boutaud et al. 2010, p.21).

L'Empreinte belge est de 2,2 fois plus grande que l'Empreinte moyenne mondiale. Proportionnellement, l'Empreinte belge des terrains bâtis et des terres cultivées sont très élevées, respectivement 5,1 et 3,3 fois plus grandes que la moyenne mondiale. Ceci s'explique par la superficie moyenne des habitations importante par habitant et une infrastructure routière très dense et par une consommation élevée de viande, qui demande

une grande surface agricole et un élevage intensif, nécessitant beaucoup de terre cultivées pour produire les fourrages (Boutaud et al. 2010, p.25; Bruers & Verbeeck 2010, p.30).

L'Empreinte carbone belge constitue 2,44 ha_g par personne, ce qui équivaut presque l'Empreinte moyenne mondiale totale. Elle explique l'essentiel de l'augmentation de l'EE de la consommation belge sur la période 1961-2006 (voir Graphique 5). Elle concerne aujourd'hui environ la moitié de l'Empreinte totale et est attribuable à la croissance du recours aux énergies fossiles. La baisse du composant 'terres cultivées' dans l'ensemble de l'Empreinte est le résultat de l'augmentation de la productivité agricole, et non d'une baisse de consommation. Néanmoins, cette augmentation de la productivité se traduit en une croissance de l'Empreinte carbone, vu qu'elle est principalement due à une mécanisation (utilisation des machines agricoles) et à une utilisation croissante d'engrais chimiques, dont la production nécessite beaucoup d'énergie (Boutaud et al. 2010, p.24 et 32).

Graphique 5: L'évolution de l'EE belge par type de sol, 1961-2006



Source : Boutaud et al. 2010, p.24

L'Empreinte carbone de la production est en nette augmentation sur la période 1961-2006. En analysant le détail des émissions de CO₂ par secteur économique (voir Graphique 6), plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer les tendances: la légère décline à la fin des années 70 et au début des années 80 serait essentiellement due aux crises économiques et la réduction des émissions de CO₂ dans les secteurs industriels et résidentiel qui en découle et à l'émergence de l'énergie nucléaire. A la fin des années 90, on observe une stagnation de l'Empreinte carbone de la production, correspondant à la diminution de l'Empreinte liée aux émissions de CO₂ des secteurs industriels. Trois hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette diminution :

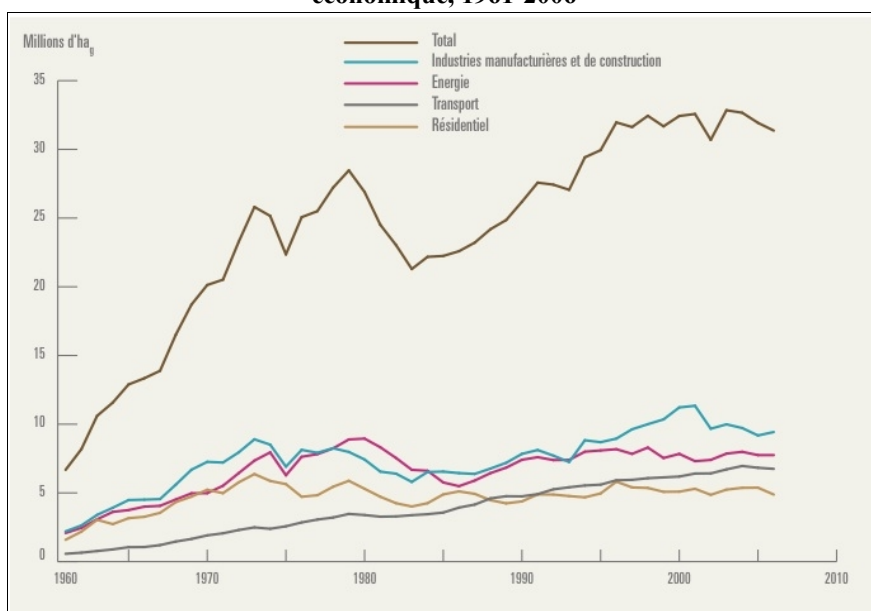
1. L'instauration d'une réglementation environnementale plus stricte pour limiter les émissions ;
2. Le ralentissement de l'économie belge pendant cette période ;

3. Une tendance à la délocalisation des industries lourdes, spécialement dans le domaine de la métallurgie. Cette industrie connaît effectivement la diminution la plus importante de son Empreinte (voir Graphique 7).

L'Empreinte carbone du secteur chimique et pétrochimique ne cesse d'augmenter (de 0,8 millions de ha_g en 1961 à 3,5 millions de ha_g en 2006). La plus grande croissance s'est produite depuis les années 90, reflétant l'importance de la production et de l'exportation des polymères et des fertilisants/engrais chimiques pour la Belgique (Boutaud et al. 2010, pp.27-29 et 32).

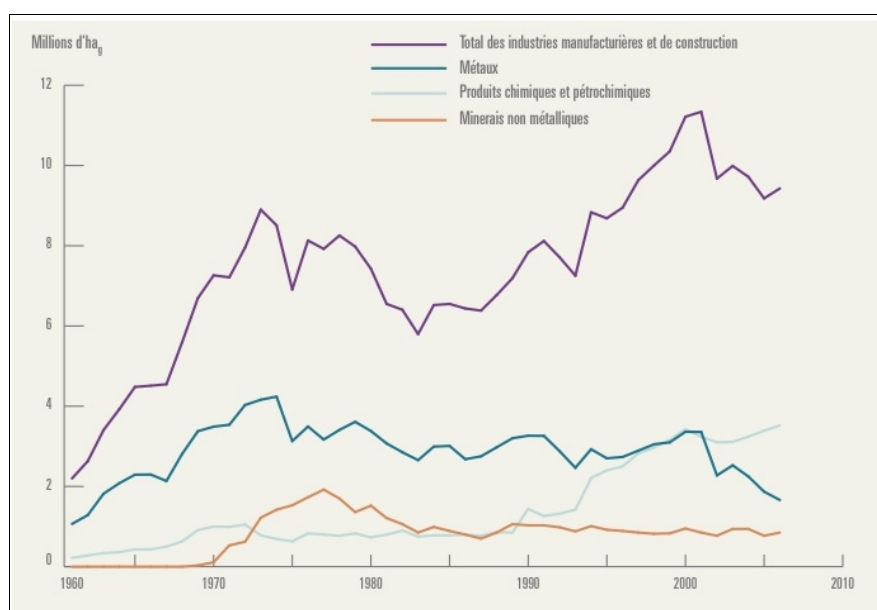
L'Empreinte carbone des importations nettes est négative, impliquant que la Belgique est exportateur net d'Empreinte carbone. Au même temps, l'importation nette en poids a augmenté d'un facteur 10 sur la période étudiée. L'hypothèse suivante permettrait de réconcilier ces deux tendances : la Belgique importe beaucoup de produits à faible intensité carbone (pétrole brut, minerais de fer, alliages bruts d'aluminium, ...) et les transforme en une faible quantité de produits à très haute intensité carbone et destinés à l'exportation (polymères, engrais azotés, moteurs automobiles, ...). En 1995, on observe les exportations nettes les plus importantes, pour remonter ensuite. Cette remontée serait due à une diminution des exportations des produits à haute intensité carbone et l'augmentation des importations de ces produits. A nouveau, cette tendance peut être le résultat de la délocalisation de l'industrie lourde (Boutaud et al. 2010, p.29).

Graphique 6: L'évolution de l'Empreinte carbone belge par secteur économique, 1961-2006



Source : Boutaud et al. 2010, p.28

Graphique 7: L'évolution de l'Empreinte carbone belge du secteur industriel, 1961-2006



Source : Boutaud et al. 2010, p.28

L'Empreinte écologique flamande sur base des Comptes Nationaux d'Empreinte

Malgré qu'une autre édition des CNE est utilisée pour les calculs, les résultats pour la Flandre sont assez cohérents avec les résultats belges (Bruers & Verbeeck 2010, p.42) Le Flamand moyen avait une EE de 6,3 ha_g en 2004 et la répartition selon les types de sols était très similaire à la répartition belge. L'EE des importations et des exportations flamandes est relativement élevée par rapport à l'Empreinte de la consommation, respectivement 25,5 et 23,8 par rapport à 6,3 ha_g par personne. La marge d'erreur sur l'EE flamande de la consommation dépend par conséquent fortement des marges d'erreur des estimations de l'EE des importations et des exportations (Bruers & Verbeeck 2010, p.32). La Flandre dépend aussi bien que la Belgique fortement des importations de l'extérieur. Malgré des importations importantes en termes de carburants fossiles, uranium et électricité (19,69 ha_g par personne), elle est exportateur nette d'Empreinte carbone (19,98 ha_g par personne). Ceci s'explique par l'exportation des produits intensifs en énergie (surtout des polymères), fabriqués à partir des vecteurs d'énergies importés (Bruers & Verbeeck 2010, pp.30, 32 et 35).

L'Empreinte carbone de la Flandre est constitué d'un tiers par les émission directes du secteur de la production d'énergie (1,1 ha_g par personne). 0,85 ha_g par personne est imputable au secteur de l'industrie (surtout la pétrochimie, responsable pour 0,4 ha_g par personne), le transport routier vaut 1,34 ; les ménages 0,63 ; le secteur des services 0,3 et le secteur agricole 0,15 ha_g par personne (Bruers & Verbeeck 2010, p.35).

3 Analyse critique de l'Empreinte écologique

3.1 Les principales critiques

Les principales critiques sur l'EE peuvent être regroupées en cinq catégories : des critiques concernant les limites d'ordre méthodologique, les limites des impacts écologiques considérés, les hypothèses scientifiques qui sous-tendent l'EE, les hypothèses économiques et sociopolitiques qui sous-tendent l'EE et son application.

Limites d'ordre méthodologiques

Limites liées aux bases de données disponibles et leur qualité

Le GFN reconnaît que plusieurs erreurs potentielles d'ordre méthodologique et conceptuel peuvent survenir par manque de données adéquates et fiables :

- Les erreurs d'allocation : des données incomplètes ou incorrectes sur le commerce et le tourisme emmènent à des distorsions dans la distribution de l'EE sur les pays producteurs et consommateurs. La consommation d'un touriste est actuellement attribuée au pays visité au lieu du pays de résidence du touriste. Les CNE n'incluent pas non plus les données sur le commerce international des services. Par conséquent, l'EE de ces services sera fautivement allouée au pays d'origine. Pour calculer l'EE incorporée dans les produits commerciaux, l'intensité en EE moyenne mondiale est largement utilisée et constitue une autre source de distorsion. Le biais introduit par ces problèmes n'est pas systématique, mais dépend du flux de commerce net d'un pays donné et de son intensité d'Empreinte carbone incorporée par rapport à la moyenne mondiale (Ewing, Moore, et al. 2010, p.91).
- Des erreurs dans les bases de données statistiques pour une année donnée : la plupart des données sur le commerce et la production sont tirées des bases de données des Nations Unies, qui contiennent des valeurs reportées par les pays individuels. La couverture est parfois incomplète et certaines données reportées sont questionnées. Les bases de données ne sont pas toujours cohérentes à travers le temps et à travers les régions (Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.387; Ewing, Moore, et al. 2010, p.91).
- Représentation déformée systématique des données reportées dans les bases de données des Nations Unies : des distorsions peuvent résulter du fait du sur-reportage de la production pour les économies planifiées, du sous-reportage de la récolte de bois sur les terrains publics, des organismes statistiques mal subsidiés et des activités de subsistance, du marché noir et des activités non-marchandes (informelles) (Ewing, Moore, et al. 2010, p.91).
- L'omission systématique des données dans les statistiques des Nations Unies : il y a des demandes sur la nature qui ne sont pas, ou pas de façon adéquate, documentées dans les statistiques des Nations Unies.

Des exemples sont les impacts biologiques du manque d'eau douce ou de sa pollution, les impacts des déchets sur la productivité biologique... (Ewing, Moore, et al. 2010, p.91).

Néanmoins les bases de données des Nations Unies sont les meilleures données disponibles pour permettre des comparaisons internationales (Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.387).

Problèmes d'agrégation et de substituabilité

Les concepteurs de l'EE défendent la soutenabilité forte. Néanmoins, selon van Kooten et al., la méthode de calcul de l'EE ne répond pas du tout à ces attentes. L'EE utilise des hypothèses sur comment différents types de nature peuvent être substitués et agrégés : l'utilisation des facteurs d'équivalence implique un jugement sur la substituabilité entre différents types de capital naturel (van Kooten & Bulte 2000, p.386). Cette thèse est soutenue par van den Berg et al. Ils argumentent que l'EE utilise des facteurs de conversion physique pour convertir des consommations en surface. Ces facteurs fonctionnent comme des poids implicites aussi bien dans la conversion que dans l'agrégation. Bien que ces poids physiques soient en lien avec les principes écologiques et les lois thermodynamiques, ils ne correspondent pas nécessairement aux poids sociaux. Les poids ne reflètent par exemple pas des changements en rareté d'un produit ou des variations locales. Ce problème est encore plus pertinent vu que l'EE utilise un schéma de poids fixes. Ainsi on considère un taux de substitution fixe entre deux catégories de pressions environnementales. En plus, certaines catégories de pressions ont le même poids, bien qu'il soit clair que leurs impacts sont très différenciés. Les terrains bâtis ont par exemple le même poids que les terres cultivées, bien que transformer des terres en infrastructures implique évidemment davantage de pressions environnementales que la consacrer à l'agriculture. L'EE inciterait aussi à transformer la forêt en terre cultivées afin de multiplier la biocapacité d'un pays, puisque la productivité des terres cultivées est en moyenne plus élevée que celle des forêts (van den Bergh & Verbruggen 1999, pp.63-64; La Revue Durable 2008, p.66).

Le GFN estime que l'EE a l'avantage d'analyser de façon intégrée des impacts écologiques qui sont d'habitude analysés séparément, comme le changement climatique, la dégradation du sol, la consommation alimentaire... mais le GFN admet qu'elle suppose probablement davantage d'additivité et d'interchangeabilité entre les différents types d'utilisation de terre que ce qui est réaliste. En effet, la méthodologie actuelle des CNE ne permet pas un niveau de spécificité géographique adéquat, impliquant que la conversion des forêts en espaces urbanisés peut se traduire en un gain de biocapacité (Ewing, Reed, et al. 2010, p.1; Ewing, Moore, et al. 2010, p.90).

Impossibilité de capturer la réalité dynamique des écosystèmes et des modélisations futures

Les concepteurs de l'EE s'opposent à l'actualisation, qui attribue une valeur moindre aux capitaux dans le futur. Van Kooten et al. estiment que l'EE ne résout pas ce problème : l'actualisation est évitée, parce que l'EE est une mesure statique. Néanmoins, l'appréciation du dépassement écologique et l'élaboration des politiques,

nécessite explicitement ou implicitement des hypothèses sur comment on évalue (actualise) le futur (van Kooten & Bulte 2000, p.386). Fiala confirme cette critique, en ajoutant que le caractère statique de l'EE implique son incapacité à tenir compte de la dégradation des terres. Une population qui utilise ses terres de façon inefficace, mais sans les dégrader, peut néanmoins présenter une EE plus élevée qu'un pays qui utilise ses terres de façon très intensive, provoquant ainsi une dégradation importante du sol. Fiala a effectivement pu démontrer que les corrélations entre l'EE et un index de la dégradation des terres sont très basses. Ainsi, l'EE n'arrive pas à capturer la dégradation des sols, un aspect crucial de la soutenabilité (Fiala 2008, pp.523-524).

Deutsch ajoute à ces commentaires qu'utiliser l'EE comme indicateur de soutenabilité suppose implicitement qu'il existe un équilibre mondial des écosystèmes stable. Ceci est contraire à la vision des écosystèmes comme des systèmes complexes adaptatifs (Deutsch et al. 2000, p.352).

Les concepteurs de l'EE admettent qu'elle ne permet pas une modélisation dynamique, qui puisse générer des prévisions détaillées. En effet, chaque estimation d'une EE est comme un instantané qui donne une image des demandes en capital naturel d'une population spécifique, tenant compte des technologies et des valeurs sociales en vigueur. L'EE ne permet pas une vue dynamique sur le futur, mais elle fournit la possibilité d'évaluer la situation actuelle et de tester des scénarios alternatifs (« *et si...* ») (Rees 2000, p.373).

Estimations inadéquates de certains facteurs

Les concepteurs de l'EE confirment qu'elle sous-estime de façon systématique l'impact humain et surestime la biocapacité disponible :

- Chaque composant de l'EE n'est compté qu'une fois si plusieurs demandes concernent la même surface, par exemple le cas d'une forêt qui sert simultanément comme ressource en bois et régulateur d'eau.
- Les calculs actuels supposent que la terre soit utilisée d'une façon durable, ce qui ne correspond pas toujours à la réalité. La productivité actuelle de l'agriculture et de la sylviculture ne pourra probablement pas être soutenue sur le long terme, à cause de l'érosion et de l'épuisement du sol.
- L'impact de l'utilisation des combustibles fossiles est également sous-estimé. Puisque la soutenabilité forte exige que le stock de capital naturel soit maintenu pour les générations à venir, les combustibles fossiles utilisés devraient être compensés par une quantité équivalente d'une autre énergie stockée pour les générations futures. Dans l'EE, les combustibles fossiles sont néanmoins inclus comme la surface nécessaire à absorber les émissions de CO₂ causées par leur utilisation, ce qui implique une surface beaucoup plus réduite.
- Actuellement, l'EE ne comprend qu'une partie limitée des produits consommés et des flux de déchets générés. En l'absence de données suffisantes ou par manque de compréhension, certaines activités ne sont pas non plus inclus dans les calculs, comme par exemple l'énergie nucléaire.

Par conséquent, les Empreintes écologiques calculées, aussi alarmantes soient-elles, sous-estiment encore considérablement les pressions exercées sur la terre (Wackernagel & Rees 1996, p.52; Wackernagel & Monfreda 2004, p.3; Wackernagel & Yount 1998, p.526; Wackernagel & Silverstein 2000, pp.392-393; Ewing, Moore, et al. 2010, p.91; Boutaud & Gondran 2009, p.108).

Pour certains autres facteurs, la méthodologie actuelle des CNE ne mène pas nécessairement à une sous-estimation, mais implique toutefois un haut niveau d'incertitude ou une représentation déformée :

- L'Empreinte carbone incorporée dans le commerce international : le poids des produits importés ou exportés est multiplié par l'intensité énergétique et ensuite par l'intensité carbone, pour obtenir des tonnes de CO₂. Les CNE calculent l'intensité énergétique des produits sur base de la moyenne de nombreuses études ACV d'environ 625 groupes de produits. Néanmoins, les estimations d'intensité énergétique sont souvent imprécises et la même intensité énergétique est parfois attribuée à plusieurs catégories de produits. Les estimations ne sont pas toujours récentes non plus. Par manque d'ACV spécifiques par pays, les mêmes intensités sont appliquées, quelle que soit le pays d'origine du produit. Pourtant, les procédés de production et les technologies utilisées varient fortement d'un pays à l'autre et dans le temps. Par conséquent, un produit importé originaire d'un pays peut avoir une intensité énergétique très différente du même produit originaire d'un autre pays. Les CNE n'arrivent pas à comptabiliser ces différences (Bruers & Verbeeck 2010, pp.20-21).

A part le problème que les ACV utilisées pour calculer l'intensité énergétique ne sont pas spécifiques et parfois obsolètes, un autre problème consiste au fait que les ACV ne sont pas toujours délimitées de la même façon. Elles diffèrent également au niveau des composants de la chaîne de production pris en compte. Certaines études incluent, par exemple, la 'fin de vie' ou l'énergie nécessaire pour le transport international, tandis que d'autres négligent ces facteurs. Ceci peut mener à des problèmes de double comptage, vu que l'Empreinte carbone de la production et des bunkers comprend déjà une partie de la gestion des déchets et du transport international (Bruers & Verbeeck 2010, pp.20-21).

Finalement, les importations et les exportations du secteur du commerce et des services ne sont pas incluses dans le calcul de l'Empreinte carbone de la consommation (Bruers & Verbeeck 2010, pp.20-21; Wiedmann 2009, p.1981).

- La productivité biologique occupée par les réservoirs des centrales hydroélectriques et autres infrastructures : ces surfaces sont considérées avoir une productivité moyenne mondiale, puisqu'on ne dispose pas de meilleures données. Davantage de spécificité serait pourtant désirable.
- La biocapacité des terrains bâtis : par manque de données, elle est considérée comme celle des terres cultivées, plutôt de celle du type de sol qu'elle remplace effectivement.
- Le tourisme : à cause du manque de données sur le tourisme, son impact est attribué aux pays visités (le 'producteur'), au lieu du pays de résidence du touriste (le 'consommateur') (Best et al. 2008, pp.70-71).

Limites des impacts écologiques considérés

Certains impacts écologiques très importants ne sont pas du tout considérés dans l'EE : la disponibilité et la qualité d'eau douce, la dégradation des terres et les atteintes à la biodiversité, les GES autres que le CO₂, les pollutions autres que le CO₂ ainsi qu'une série d'autres facteurs.

L'eau douce

La nécessité de l'eau douce pour les écosystèmes est rarement reconnue. Les politiques mondiales concernant l'eau douce se focalisent surtout sur la disponibilité de l'eau douce pour les ménages, l'industrie ou l'irrigation pour l'agriculture. Pourtant, une quantité importante d'eau douce est nécessaire pour soutenir la capacité des écosystèmes à générer des services écosystémiques. Dans les pays arides, la compétition pour cette ressource peut avoir des conséquences écologiques et engendrer des coûts énergétiques importants. La surface utilisée pour collecter l'eau pour des utilisations domestiques devrait être ajoutée à l'EE, ainsi que les surfaces nécessaires à l'absorption des eaux usées. Si l'eau douce de surface est retirée pour la consommation humaine, menant à une perte de bioproduktivité, la surface nécessaire à restaurer cette perte devrait être incluse. Si l'eau des nappes phréatiques est utilisée au-delà du taux de régénération, les conséquences ne sont pas immédiatement visibles. Néanmoins, on pourrait calculer les ressources nécessaires à restaurer le niveau d'eau des nappes phréatiques originelles. Finalement, les ressources nécessaires pour les infrastructures et l'énergie nécessaire au retrait, au transport, à la distribution et à la purification de l'eau devraient également être incluses. Cette notion est actuellement encore absente dans la méthodologie de l'EE (Deutsch et al. 2000, p.353; Wackernagel & Yount 1998, pp.524-526).

La dégradation des terres et les atteintes à la biodiversité

Une analyse complète de l'EE ne comprendrait pas seulement la surface nécessaire à la production des ressources renouvelables et des services nécessaires au maintien du système, mais également la terre perdue par contamination, radiation, érosion, salinisation, déforestation, désertification et par les aménagements humains qui rendent la terre écologiquement improductive ou qui endommagent la biosphère de façon irréversible (extinction d'espèces...) (Boutaud & Gondran 2009, p.70). L'EE ne prend par exemple pas directement en compte les effets négatifs de certaines pratiques agricoles. Ainsi, l'intensification des pratiques agricoles induit une diminution d'apport à l'EE, tandis qu'elle est liée à de nombreuses pressions importantes sur l'environnement, comme l'utilisation des engrais, des pesticides, l'irrigation... Seulement une fois que ces effets ont des conséquences au niveau de la productivité des sols, elles se traduisent en une réduction de la biocapacité (van den Bergh & Verbruggen 1999, pp.64-65; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.125). Certains auteurs ont néanmoins pu démontrer que l'EE permet toutefois d'inclure les conséquences négatives de l'intensification, pourvu qu'une méthode plus appropriée soit utilisée pour calculer l'EE (bottom-up au lieu de top-down) (Deutsch et al. 2000, p.353).

Les GES autres que le CO₂

Les GES autres que le CO₂, tels que le méthane (CH₄), les oxydes d'azote (NO_x), les fluorocarbures (FC) ou le hexafluorure de soufre (SF₆) ne sont actuellement pas inclus dans les calculs. Une méthode pour inclure ces GES serait d'utiliser le potentiel de réchauffement global, qui permet de convertir chaque GES en équivalent de CO₂, en tenant compte du temps de résidence dans l'atmosphère et de sa capacité à absorber et réémettre des radiations dans l'atmosphère. Une autre méthode consisterait à calculer le temps de résidence dans l'atmosphère et les trajectoires spécifiques de séquestration par la biosphère de ces GES. La première méthode est en lien avec l'attention croissante pour les changements climatiques, mais ne permet pas de tenir compte des capacités régénératives de la biosphère pour ces autres GES. La deuxième méthode présente la difficulté que la capacité de la biosphère à séquestrer ces gaz est difficile à mesurer ou même indéfinie pour certains gaz synthétiques. Actuellement, les données nécessaires pour le calcul de l'Empreinte des autres GES ne sont disponibles pour aucune des deux méthodes (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.2000). Une étude préliminaire a été menée en Irlande pour inclure le méthane dans les calculs, mais cette pratique ne fait pas encore partie de la méthode des CNE (Walsh et al. 2009).

A partir de l'édition 2008 des CNE, les émissions de dioxyde de carbone liées au changement d'affectation des terres ont été incluses. Les émissions du torchage de gaz associé à la production de pétrole et de gaz, les émissions industriels liées à la production du ciment et les émissions liées aux incendies des forêts tropicales et à la production de certains biocarburants ont également été incluses (Ewing, Moore, et al. 2010, p.96). Néanmoins, ces émissions ne sont actuellement qu'inclus dans les calculs de l'Empreinte mondiale, mais pas dans le calcul des Empreintes nationales, pour cause de difficulté de mesure et d'allocation aux activités humaines. Ces émissions concernent 30% des émissions de CO₂ liées à la combustion des combustibles fossiles. Une analyse plus détaillée serait nécessaire pour pouvoir déterminer et quantifier les principales incitations du changement d'affectation des terres et attribuer l'EE correspondante. Le changement d'affectation des terres peut également induire l'émission d'autres GES, notamment le méthane. La mesure et l'allocation de ces gaz pose encore plus de problèmes, vu qu'elles sont souvent indirectes, comme par exemple l'émission de méthane de la toundra à cause du réchauffement climatique (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.2000).

Les pollutions autres que le CO₂

Les rejets aqueux, certains rejets atmosphériques et l'utilisation des matériaux que la biosphère n'est pas capable d'assimiler (plutonium, PCB, CFC,...) ne sont pas prises en compte dans l'EE. Certains chercheurs ont essayé d'analyser les implications en terme d'espace des rejets d'autres déchets que le dioxyde de carbone. Wackernagel et al. ont par exemple mené une recherche sur la Suède où ils ont calculé la surface en lacs et en étangs nécessaire à retenir l'azote et le phosphore issu de l'agriculture, afin d'éviter le lessivage

(Wackernagel, Lewan, et al. 1999, p.610; Rees 2000, p.372). A l'heure actuelle, ces applications ne font néanmoins pas encore partie de la méthodologie des CNE.

Autres facteurs

L'EE ne permet pas d'inclure la notion du risque, par exemple le risque d'un accident nucléaire majeur. La disponibilité ou l'épuisement des ressources non renouvelables et la distorsion ou résilience des écosystèmes ne sont pas non plus pris en considération (Ewing, Moore, et al. 2010, p.90; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.125).

Les concepteurs de l'EE reconnaissent ces limites, mais ils argumentent que l'intégration de tous les impacts écologiques possibles dans l'EE pourrait mener à un niveau de sophistication qui dépasse l'objectif principal de cet outil : fournir une analyse qui donne une image très large afin de mettre les utilisations humaines concurrentielles de la biosphère en perspective (Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.387).

Les hypothèses scientifiques qui sous-tendent l'Empreinte écologique

Les plus grandes critiques sur les hypothèses scientifiques qui sous-tendent l'EE concernent toutes la traduction des émissions de gaz à effet de serre en hectares globaux :

- L'EE ne tient pas compte du fait que d'autres types de sol que la forêt peuvent séquestrer le carbone (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999). Une étude préliminaire a été effectuée en Irlande pour essayer d'inclure d'autres 'puits carbonés', mais la méthode n'a pas encore été généralisée dans les CNE (Walsh et al. 2010).
- La surface nécessaire à la séquestration de CO₂ devrait être listée séparément de la surface de forêt et de la surface nécessaire à la préservation de la biodiversité. Ceci n'implique, selon Wackernagel et al., pas de double comptage, vu que l'absorption de grandes quantités de CO₂ nécessite une reforestation récente ou des forêts immatures. Par contre, la biodiversité est plus abondante dans des forêts plus âgées. Les forêts destinées à la séquestration du CO₂ ne peuvent pas non plus être utilisées pour la production du bois, vu que les GES seraient à nouveau émis pendant la récolte et la transformation du bois. Elles peuvent néanmoins fournir d'autres services simultanément, comme la régulation de l'eau, la formation des sols ou la prévention de l'érosion (Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.383). Néanmoins, même s'il serait possible de lister séparément la surface de forêt nécessaire à la préservation de la biodiversité, le calcul de l'EE ne permet pas de tenir compte du type de forêt, la manière dont elle est gérée, son âge.... (La Revue Durable 2008, p.66).

- Les comptes de séquestration du carbone sont cohérents avec les méthodes de comptabilité du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Néanmoins, la méthode la plus juste pour approcher un facteur de séquestration du carbone serait de calculer le taux actuel de séquestration du carbone par année sur toute la surface de forêt gérée dans ce but, c'est à dire une forêt qui fait l'objet d'un engagement à long terme de non exploitation. Vu qu'il n'existe pas d'estimation globale de la séquestration de carbone pour les surfaces de forêts dédiées à cette fonction, les CNE utilisent les données de la FAO sur la productivité de chaque forêt permanente, gérée ou non, qui n'est en tout cas pas destinée à être exploitée ou brûlée pour faire place à des cultures (La Revue Durable 2008, pp.69-70). Une autre remarque concernant le facteur de séquestration est le fait qu'utiliser le taux de séquestration actuel reflète potentiellement une sur-utilisation historique plutôt qu'une capacité régénérative inhérente de séquestration (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999).
- Fiala argumente finalement que l'EE calcule la surface de forêt nécessaire à la séquestration de tous les émissions de CO₂ produites. Selon lui, il est néanmoins possible qu'un taux de séquestration inférieur à 100% permette de rester dans les limites soutenable (Fiala 2008, p.520). Kitzes et al. contestent cette opinion, en argumentant que, comme pour tout déchet, seulement l'absence d'une accumulation nette dans la biosphère permet de garantir la soutenabilité sur le long terme (Kitzes, Moran, et al. 2009, p.929).

Les hypothèses socio-politiques et économiques qui sous-tendent l'Empreinte écologique

Outil anthropocentré

Malgré son orientation fortement écologique, l'EE reste un outil très anthropocentré: les ressources naturelles sont uniquement considérées sous leur aspect utilitaire pour l'homme, et la biodiversité en soi n'est pas prise en compte (Boutaud & Gondran 2009, p.108).

Un parti pris contre le commerce

Les défenseurs de l'EE tendent vers l'opinion que l'autosuffisance est une condition nécessaire pour la soutenabilité. Les opposants estiment, par contre, que ces deux ne sont pas nécessairement liées et que l'EE est de parti pris contre le commerce (Costanza 2000, p.343). En effet, les CNE comparent l'EE d'une région à la surface bioproductive disponible dans cette région et estiment que la première ne devrait pas dépasser la dernière. Néanmoins, selon Van den Bergh et al. le commerce n'a pas nécessairement des conséquences négatives sur l'environnement. L'EE néglige les avantages comparatifs de certaines régions en termes de ressources naturelles et écologiques. Ainsi, vu la distribution inégale des ressources naturelles, le commerce et la spécialisation peuvent engendrer des gains environnementaux. Les pressions écologiques peuvent être

distribuées parmi les écosystèmes les moins sensibles, pourvu que des régulations et incitations nationales et internationales correctes soient mises en place (van den Bergh & Verbruggen 1999, pp.67-68). Le commerce des droits d'émission et la « Mise en Oeuvre Conjointe » qui font partie du protocole de Kyoto sont des exemples qui démontrent ce point de vue (Ayres 2000, p.348). Finalement Van den Bergh et al. avertissent qu'une diminution du commerce peut engendrer des effets négatifs sur le plan social et politique : une dégradation des relations internationales, la déstabilisation des accords et des institutions commerciales, une diminution de la diffusion des connaissances et des informations, l'élargissement de l'écart entre les régions riches et pauvres dans le monde... (van den Bergh & Verbruggen 1999, p.69). Selon Deutsch et al. l'EE en soi n'est pas de parti pris contre le commerce. L'EE peut être utilisée pour démontrer la dépendance de certaines nations sur les écosystèmes d'autres nations. Ceci n'implique pas nécessairement que cette dépendance soit mauvaise en elle-même. Néanmoins, l'écart entre la demande du marché mondial et la capacité des écosystèmes à la soutenir est inquiétant selon lui (Deutsch et al. 2000, p.354). Effectivement, une région où l'EE dépasse la biocapacité locale, est amenée à importer des ressources d'ailleurs, à exporter des déchets ou à épuiser son propre stock de capital naturel (c'est à dire utiliser plus de services écologiques que la biocapacité locale peut régénérer). Néanmoins, il est physiquement impossible que chaque région soit un importateur net. Pour atteindre la soutenabilité, il faut alors que l'ensemble des Empreintes écologiques régionales ne dépasse pas la surface totale de la biosphère. Le déficit écologique local n'est, selon Wackernagel et Yount, qu'une indication de la vulnérabilité et de la contribution potentielle à la régression écologique (Wackernagel & Yount 1998, pp.511-512). Wackernagel et al. démontrent que le commerce, sous ses conditions actuelles, menace la stabilité écologique mondiale et locale. Vu que l'épuisement du stock naturel local ne met plus immédiatement en péril l'économie locale, l'exploitation insoutenable des stocks locaux et l'investissement des gains dans des entreprises plus profitables ailleurs, est économiquement raisonnable. Evidemment, sur le long terme, ces processus menacent le potentiel de productivité mondial et l'intégrité des écosystèmes. Wackernagel et Rees plaident alors pour l'augmentation de l'autonomie régionale, pour l'autosuffisance et pour un cadre international avec des régulations et des incitations qui favorisent le commerce durable (Wackernagel & Rees 1997, pp.3, 15 et 21-22).

Le scepticisme envers les progrès technologiques

L'EE doit être considérée comme un indicateur provisoire de soutenabilité, vu que c'est un indicateur sceptique vis à vis des progrès technologiques. En effet, nos modes de vies pourraient être soutenables, si les progrès technologiques permettaient de contourner toute limite biophysique rencontrée (Costanza 2000, p.342). Un exemple est la mesure de l'impact énergétique : l'EE calcule la surface de forêt nécessaire pour capturer le CO₂ produit par la combustion des combustibles fossiles. Néanmoins, la séquestration du CO₂ par les forêts n'est qu'une solution parmi d'autres. L'EE ne tient pas compte des nouvelles possibilités de séquestration de carbone, par exemple dans les champs de gaz ou de pétrole partiellement extrait ou dans

l'océan profond (Ayres 2000, p.348). Il est d'ailleurs probable que ces solutions techniques soient développées, vu que la séquestration par la forêt est une solution qui nécessite beaucoup de terre et qui ne tient pas compte du fait qu'il n'y aura peut-être pas assez de terre disponible appropriée pour les forêts. En plus, la disponibilité, le prix et la productivité des forêts diffèrent fortement entre pays et régions. Ainsi, en lien avec la théorie du coût marginal, plus la terre disponible à la reforestation devient rare, plus son prix augmente. Par conséquent, d'autres solutions durables, mais moins intensives en utilisation de terre, seront préférées. L'EE néglige cette possibilité (van den Bergh & Verbruggen 1999, pp.65-66). A part d'autres moyens de séquestration, d'autres alternatives pour produire de l'énergie sans émettre du CO₂ seraient également préférées, comme l'énergie nucléaire, éolienne, marémotrice, hydraulique ou photovoltaïque (Ayres 2000, p.348).

L'utilisation d'une échelle géographique arbitraire

L'échelle géographique utilisée pour calculer l'EE est, selon certains auteurs, arbitraire. En effet, les frontières nationales ont une signification géopolitique ou culturelle, mais non environnementale. Si on veut calculer des Empreintes écologiques régionales, ce serait mieux, selon ces auteurs, de se focaliser sur des frontières environnementales (hydrologiques, écologiques). L'emplacement des villes, de l'agriculture et des industries est largement influencé par les ressources naturelles disponibles, le sol, le climat... Ainsi l'EE élevée des régions fortement peuplées est le résultat des facteurs d'allocation spatiale et des spécialisations et néglige l'effet positif de la concentration spatiale des humains sur la soutenabilité environnementale. Par conséquent, l'EE ne serait pas un bon indicateur pour la soutenabilité régionale ou locale (van den Bergh & Verbruggen 1999, p.66 et 70). Wackernagel et Silverstein remettent cette hypothèse en question, en argumentant que les écosystèmes sont formés par la façon dont ils sont utilisés. Les frontières politiques sont alors pertinentes, vu que les politiques et la gestion des écosystèmes, les schémas d'utilisation de ressources et la collecte de données sont principalement organisés au niveau national (Wackernagel & Silverstein 2000, p.393). De plus, les résultats de l'EE sont également exprimés par habitant, pour rendre la comparaison entre pays possible, quel que soit la densité de leur population (Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.383).

L'application de l'Empreinte écologique

Le niveau de connaissance et de compréhension écologique dans la société est assez limité. L'impact écologique de nos consommations est très dilué dans le temps et dans l'espace et échappe par conséquent à notre perception immédiate. L'EE rend ces phénomènes appréhensifs à une échelle mondialisée, vu qu'elle permet d'avoir une vue globale de l'état de l'environnement de notre planète, qui intègre une multitude d'impacts. Elle arrive également à démontrer clairement la dépendance des humains envers les écosystèmes. De plus, la notion de surface est facilement compréhensible par tout le monde, tandis que d'autres grandeurs physiques peuvent requérir des connaissances techniques pour être appréhendées (Jolia-Ferrier & Villy 2006,

p.16 et 74; Boutaud & Gondran 2009, p.83; Costanza 2000, p.342; Deutsch et al. 2000, p.354).

Malgré un consensus assez large sur la valeur pédagogique de l'EE, certains chercheurs estiment qu'elle peut être trompeuse. D'un côté sa simplicité apparente masque les interactions entre les impacts et les nombreuses hypothèses nécessaires à sa réalisation : si on n'est pas attentif et bien informé, on ignore d'où viennent les chiffres, comment ils ont été agrégés, quelles sont les incertitudes, les poids et les hypothèses concernées... (Costanza 2000, p.342; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.46). D'autre part, l'EE est une valeur hypothétique, qui peut dépasser la surface réellement disponible sur terre. En donnant l'impression qu'il s'agit d'une utilisation de terre réelle et même réaliste, ceci pourrait, selon van den Bergh et Verbruggen, induire le public en erreur (van den Bergh & Verbruggen 1999, p.64).

Bien que la plupart des chercheurs reconnaissent la valeur pédagogique de l'EE, les opinions sont beaucoup plus partagées sur la valeur de l'indicateur pour la décision publique. Certains argumentent pour une application générale dans le domaine politique, tandis que d'autres voient un rôle beaucoup plus restreint (Costanza 2000, p.342).

Beaucoup d'auteurs apprécient l'aspect mobilisateur de l'EE. Elle est facilement compréhensible et communicable et elle peut donc jouer un rôle important pour alerter et mobiliser un grand public. L'EE permet de démontrer clairement que notre économie actuelle dépasse la biocapacité disponible. Elle est alors un puissant levier de changement, parce qu'elle incite les acteurs à passer à l'action. « *L'Empreinte interpelle les usagers, les incite à comprendre et à évaluer, même à la louche, l'impact de leurs actions quotidiennes* » (La Revue Durable 2008, p.73; Wackernagel & Yount 1998, p.522 et 527; Deutsch et al. 2000, pp.352-354). De plus, l'utilisation pratique du concept de l'EE est facilement accepté et non polémique pour les praticiens, vu que son approche et les données utilisées n'incluent pas d'appréciations, mais travaillent sur des faits ou des hypothèses consensuelles. En quelque sorte, l'EE est même plus cohérente avec la vision du monde d'un utilitariste que d'un environnementaliste. Elle aide alors à créer des liens entre personnes qui ne se mettraient probablement pas d'accord autrement (Wackernagel & Silverstein 2000, p.349; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.48 et 82). Finalement, l'EE permet un changement de cap politique. Au lieu de se focaliser sur des variables actuelles et leur taux, comme les surfaces des écosystèmes, les chiffres démographiques ou le niveau de l'eau, elle se focalise sur les caractéristiques systémiques durables, comme la résilience, la capacité adaptative et la capacité régénérative (Deutsch et al. 2000, p.354).

Certains auteurs croient que l'EE peut aider à orienter les politiques : elle permet de comparer à « *un seuil de durabilité* », de fixer ainsi un cap et de mesurer des résultats. Tenant compte de la croissance démographique et de la détérioration écologique, la surface disponible pour chaque personne se réduira davantage. La question clé devient ainsi : comment assurer une qualité de vie appropriée à toute personne, toute en restant dans notre 1,8 ha_g? L'EE peut démontrer les secteurs d'activité humaine caractérisés par une utilisation excessive de biocapacité. Elle offre aussi la possibilité de faire varier des paramètres et d'établir des

simulations. Ceci permet de déterminer les leviers les plus efficaces pour orienter les politiques. Vu que le commerce mondial incite à l'épuisement du capital naturel local, le calcul des Empreintes locales permet de calculer combien de ce capital naturel est nécessaire à la consommation locale et combien est disponible pour l'exportation. L'importance des investissements dans le capital naturel local, comme la reforestation, le contrôle de l'érosion ou la décontamination deviennent alors des stratégies d'investissements rationnelles. Finalement, calculer des séries d'Empreintes écologiques chronologiques permet de surveiller le progrès d'une région vers la soutenabilité (Wackernagel & Yount 1998, p.522 et 527; Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.66 et 75). Néanmoins, ces auteurs admettent également que l'EE a ses limites. Ses concepteurs indiquent, par exemple, qu'elle ne mesure pas la qualité de la vie humaine et qu'elle doit par conséquent être complétée par des indicateurs sociaux afin d'évaluer de façon plus compréhensive le progrès vers le développement durable. Elle a également des limites importantes en ce qui concerne l'utilisation de l'eau, les polluants persistants et la biodiversité et elle n'est pas capable de refléter les conséquences des activités actuelles sur l'EE et la biocapacité futures. Une vue plus globale nécessite ainsi l'utilisation d'indicateurs supplémentaires (Kitzes, Galli, et al. 2009, pp.2000-2001; Wackernagel, Onisto, et al. 1999, p.389).

La valeur de l'EE se situe, selon ces chercheurs, surtout dans la phase de construction des connaissances, plutôt que comme outil de décision objectif et ultime. L'atout de l'EE est surtout sa valeur symbolique comme contrepoids pour le PIB pour orienter nos choix de société. Une gestion technique nécessite néanmoins une batterie d'indicateurs plus hétérogènes, qui permettent de cerner de façon plus spécifique les problématiques concernés. Cette batterie d'indicateurs doit néanmoins être accompagnée par un indicateur plus synthétique, comme l'EE, qui permet une approche systémique des enjeux environnementaux. Ainsi, on évite l'amélioration d'un composant d'un tableau de bord au détriment d'un autre (Boutaud et al. 2010, p.12). Un exemple concret est l'analyse de l'impact des agrocarburants : une analyse qui se limite à mesurer l'Empreinte carbone d'un agrocarburant, type éthanol, montre un impact plus faible pour l'agrocarburant que pour l'essence. En revanche, une analyse complète, tenant compte de l'Empreinte liée aux terres cultivées, montre que l'EE de l'agrocarburant peut bien être supérieure à celle de l'essence (Kitzes & Wackernagel 2009, p.814; David et al. 2010, pp.16-17).

Néanmoins, d'autres chercheurs considèrent que l'EE n'a pas du tout de valeur ajoutée en termes politiques : *« Overall, this means that the Ecological Footprint could at best be an indicator of instantaneous non-sustainability at the worldwide level. EFs for countries should be used as indicators of inequality in the exploitation of natural resources and interdependencies between geographical areas. Moreover, even the worldwide ecological deficit emphasized by the EF may not convey the message it is said to. Indeed, one can show that the worldwide imbalance is mostly driven by CO₂ emissions, expressed in hectares of forest needed for storage. By definition, the worldwide demand placed on cropland, built-up land and pasture cannot exceed world biocapacity⁷ »* (Stiglitz et al. 2009, p.71). Ledant ajoute que l'EE démontre que le niveau de consommation

⁷ Traduction : « En tout, ceci veut dire que l'Empreinte écologique est au mieux un indicateur de la non-soutenabilité instantanée au niveau mondial. Les Empreintes écologiques nationales devraient être utilisées comme des indicateurs d'inégalité

actuel n'est pas compatible avec le maintien d'un statut quo, qui est, selon lui, de toute façon irréaliste. Ainsi, elle ne dit rien sur la durabilité du développement (Ledant 2005, p.18). Van den Berg et al. avertissent que l'utilisation de l'EE pour orienter les politiques peut même mener à des solutions politiques insoutenables, inefficaces et même immorales, à cause des problèmes de substituabilité, d'agrégation et la délimitation de l'EE (van den Bergh & Verbruggen 1999, p.71).

Finalement, en 2010, Wiedmann et Barret ont mené une enquête sur les perceptions autour de l'EE. Ils ont interviewé plus de 50 experts internationaux et passé en revue 150 études sur l'EE. La conclusion de leur enquête fait, de façon très pertinente, le point sur les controverses : « *In conclusion of the survey, the experts perceived that it is time to be clearer about the Ecological Footprint and recognize it as a powerful tool for communicating over-consumption of humanity whilst being aware of its limitations in other areas. It can act as a strong statement in reports to identify and communicate potential sources of unsustainability to the general public and to political and corporate decision-makers. This is a clear statement of over-consumption that has still not been accepted by governments or thought about widely by the general public. However, the Ecological Footprint as it stands now cannot provide the information by which to conduct profound policy assessment. In the quest to derive an indicator that can challenge GDP, statements have been made about the Ecological Footprint that are not always in line with its scientific rigor or application potential*⁸ » (Wiedmann & Barrett 2010, p.1652).

3.2 Faiblesses des CNE spécifiques pour la Belgique

Comparaison des résultats des CNE avec les résultats de la DGSIE et le VITO

Les calculs de la DGSIE, basé sur des statistiques belges, ont démontré que l'utilisation des données nationales plus détaillées, plus précises et plus récentes peut sensiblement améliorer les estimations de l'Empreinte. L'estimation de la biocapacité belge, obtenu à partir des données nationales, était de 75% plus élevée que celui calculé par le GFN. L'estimation pour l'EE de la consommation était 35% plus important que celui du GFN (6,1 ha_g au lieu de 4,52 ha_g). La plus grande partie de cet écart est attribuable à un facteur de rendement beaucoup plus élevée sur base des données plus précises (2,73 au lieu de 1,64) et des données

d'exploitation des ressources naturelles et des interdépendances entre régions géographiques. En plus, même le déficit écologique mondial dévoilé par l'Empreinte écologique pourrait ne pas faire passer le message prétendu. Effectivement, il peut être démontré que le déséquilibre mondial est surtout causé par les émissions de CO₂, exprimées en hectares de forêt nécessaires pour la séquestration. Par définition, la demande de terres cultivées, des terrains bâtis et des pâturages ne peut pas dépasser la biocapacité mondiale. »

- 8 Traduction : « Comme conclusion de l'enquête, les experts ont remarqué qu'il est temps d'être plus clair sur l'Empreinte écologique et de la reconnaître comme un outil puissant pour communiquer la surconsommation de l'humanité, tout en étant conscient de ses limites dans d'autres domaines. Elle peut servir dans des rapports comme message puissant qui identifie et communique les sources potentielles d'insoutenabilité à un large public et aux décideurs politiques et d'entreprise. Ce message très clair de notre surconsommation n'est toujours pas accepté par les gouvernements, ni considéré par un large public. Néanmoins, l'Empreinte écologique dans son état actuel ne peut pas fournir l'information nécessaire à mener une évaluation profonde des politiques. Dans la recherche des indicateurs qui peuvent défier le PIB, des déclarations sur l'Empreinte écologique ont été faites qui ne sont pas en cohérence avec sa rigueur scientifique ou son potentiel d'application. »

plus précises sur les importations et les exportations, venant d'Intrastat, une base de données de la Banque Nationale de Belgique contenant des statistiques sur le commerce extérieure (Janssen 2008, pp.61 et 64-66). L'importance relative des terres cultivées et des terrains bâtis augmente sensiblement, pour atteindre une valeur de 53% et 7% respectivement. L'importance relative de l'Empreinte carbone diminue, par contre, jusqu'à 30% de l'Empreinte totale.

Les calculs du VITO se basent sur un modèle E/S multi-régionaux (MRIO), qui décrit des tableaux d'E/S⁹ pour la Flandre, pour l'ensemble de Bruxelles et Wallonie, pour l'Union Européenne et pour le reste du monde. Ces tableaux d'E/S monétaire sont ensuite complétés par des tableaux d'extension environnementale (par exemple des tableaux sur les émissions dans l'atmosphère et l'utilisation des matériaux). Sur base de ces tableaux, les émissions de CO₂ totales pour la production, les importations et les exportations flamandes sont calculés et convertis en ha_g. Les calculs sur base du modèle d'E/S sont uniquement faits pour l'Empreinte carbone (Bruers & Verbeeck 2010, pp.14-15)

Tableau 1 présente la comparaison entre les estimations de l'Empreinte carbone sur base de la méthode des CNE et sur base du modèle E/S. L'Empreinte carbone de la consommation des deux méthodes est très comparable (seulement 7% de différence). Les valeurs pour les importations et les exportations sont néanmoins 4 fois plus grands sur base de la méthode des CNE que sur base du modèle E/S, malgré le fait que seulement 85% du poids total d'exportations et d'importations est inclus dans les calculs sur base de la méthode des CNE. Les 15% restants concerne des produits qui ne rentraient pas dans les catégories de produits prévu par les CNE. L'écart peut s'expliquer par trois facteurs possibles :

- La méthode des CNE se base sur un facteur de conversion très élevée : l'intensité carbone moyenne mondiale de l'électricité.
- Les estimations de l'intensité énergétique de la méthode des CNE ne sont pas actualisées, ni spécifiques. Il est probable qu'il y a eu des gains en efficacité énergétique pour les produits importés, qui impliquent que les estimations sont probablement devenu trop élevées.
- La délimitation des études ACV, utilisées pour calculer les estimations de l'intensité énergétique est peut-être trop étendu, menant à des problèmes de double comptage.

Le fait que l'Empreinte carbone des exportations nettes de polymères (1,7 ha_g/personne) est plus élevée que l'ensemble de l'Empreinte carbone des secteurs de l'énergie et de la pétrochimie en Flandre (1,5 ha_g/personne), fait soupçonner que l'Empreinte carbone des importations et des exportations est sévèrement surestimée. Il n'est pas certain que les trois explications possibles avancées ici, soient suffisantes pour expliquer des écarts aussi importants (Bruers & Verbeeck 2010, p.37).

⁹ Un tableau d'E/S montre les entrées (= les achats faits par chaque secteur économique pour fabriquer ses produits, y-compris les importations) et les sorties (les biens et services produits pour la consommation intermédiaire ou finale, ou pour les exportations).

Tableau 1: Comparaison de l'EE_c flamande selon les CNE et selon le modèle d'E/S

	Méthode CNE (Ecolife) Ha _g /personne	Méthode modèle d'E/S (VITO) Ha _g /personne
Production	2,56	2,56
Bunkers	0,12	0,12
Ménages	0,96	0,96
Importations (sans électricité)	19,69	4,50
Importations électricité	-	0,52
Exportations	19,98	5,06
Consommation	3,35	3,59

Source : Bruers & Verbeeck 2010, p.36

Leçons à tirer pour notre analyse

Plusieurs des problèmes révélés ici ont été résolus dans l'édition 2010 des CNE, portant sur l'année 2007. Une meilleure prise en compte des flux commerciaux internationaux dans la méthode de calcul a provoqué une hausse importante de l'EE belge de 5,7 ha_g par personne en 2006 à 8 ha_g par personne en 2007 (GFN 2010b, p.2). L'édition 2010 utilise également un facteur de rendement plus adéquat de 2,51 pour les terres cultivées. Finalement, le facteur de conversion pour calculer l'Empreinte carbone incorporée dans les produits importés a été remplacé par l'intensité carbone moyenne mondiale des énergies primaires, au lieu de l'intensité carbone moyenne mondiale de l'électricité. Ceci constitue une amélioration, mais reste néanmoins une estimation qui ne tient pas compte du mix énergétique réel du pays exportateur. Le facteur de conversion pour calculer l'Empreinte carbone incorporée dans les produits exportés, par contre, est bien calculé sur base des émissions de CO₂ de la production domestique. Vu l'importance de l'EE des importations et des exportations pour la Belgique (et pour la Flandre), la méthode de calcul de l'intensité énergétique et de l'intensité carbone des produits importés et exportés influence fortement les résultats. Les études sur la Suisse et la France, qui ont également comparé l'EE des CNE avec l'EE calculée sur base des données statistiques nationales plus détaillées, ont également révélé un grand écart entre les deux Empreintes au niveau de l'énergie incorporée dans les importations et les exportations. Des recherches additionnelles sont alors nécessaires pour éclaircir ces ambiguïtés (David et al. 2010, p.13; von Stokar, Steinemann & Ruëgge 2006, p.25). L'utilisation des analyses E/S dans les CNE est par conséquent révisée. Dans l'édition 2010, les estimations sont encore calculées sur base des poids de flux de produits entre pays, multipliés par l'intensité en EE en ha_g par tonne (méthode PLUM) (Ewing, Moore, et al. 2010, p.95).

3.3 Améliorations prévues

Plusieurs autres recherches et analyses sont prévues pour améliorer les éditions futures des CNE :

- Le calcul des facteurs d'équivalence : des nouvelles estimations de la production primaire nette mondiale pourraient permettre d'utiliser la production primaire nette utilisable pour calculer les facteurs d'équivalence au lieu de la méthode de l'indice d'appropriation qui est utilisée actuellement. Un autre avancement serait de combiner la carte des zones agro-écologiques et leurs productivités potentielles (Global Agro-Ecological Zones map of potential productivity) et la carte des types de sols actuels (Global Land Cover map). Cette combinaison permettrait une vue spatiale qui reflète la qualité réelle des sols attribués actuellement à chaque type de sol. Cette méthode permettrait également le calcul d'un facteur d'équivalence spécifique pour les terrains bâtis, fondé sur les types de sol qui sont effectivement couverts par ces terrains bâtis (Ewing, Moore, et al. 2010, p.96).
- L'empreinte carbone : l'Empreinte carbone constitue la demande humaine la plus importante sur la biosphère. Des changements dans la méthode de calcul de l'Empreinte carbone sont susceptibles de changer considérablement les Empreintes écologiques. Plusieurs aspects de la méthode actuelle ont besoin d'être approfondis : comment inclure d'autres GES que le CO₂ ? Comment calculer de façon plus précise la capacité de séquestration des océans et des forêts ? Comment prendre en compte les différences entre la séquestration par les conifères et celle de la végétation à feuilles caduques ? L'accumulation de la biomasse au sous-sol devrait-elle être incluse également ? Finalement, les valeurs sur l'énergie incorporée utilisées dans les CNE seront bientôt basées sur la base de données 'Ecoinvent', une des plus importantes bases de données mondiales d'ACV (Ewing, Moore, et al. 2010, p.96).
- Calculs de rendements constants : pour pouvoir interpréter des séries chronologiques de façon adéquate, une méthode sera développée pour convertir des ha_g, qui représentent une quantité de productivité actuelle qui change année par année, en hectares globaux constants (Ewing, Moore, et al. 2010, p.97).
- Le lien et l'harmonisation entre les CNE et d'autres systèmes de comptabilité économiques et écologiques existantes doit être éclairé (Ewing, Moore, et al. 2010, p.97).

Chapitre 2 : analyse de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires

Avant d'analyser l'impact de différents scénarios de production d'électricité sur l'EE belge dans le chapitre suivant, j'étudierai l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires. L'intensité d'EE est le nombre d'hectares globaux nécessaires pour produire une quantité donnée d'un produit. Ici il s'agit d'une production d'électricité par an, exprimée en $\text{ha}_g(\text{TWh}_e \cdot \text{an})^{-1}$. Cette analyse permet d'étudier l'impact de chaque vecteur énergétique de façon isolée, sans qu'il y ait des interactions entre variables. Ainsi il s'agit d'une étape préparatoire importante afin de calculer et interpréter l'EE des scénarios présentés dans le chapitre suivant.

Dans la première section de ce chapitre, la façon dont les impacts de la production d'électricité issue de différentes énergies primaires sont exprimés en termes d'EE, est détaillée. Ensuite, les résultats des calculs d'intensité d'EE pour la production d'électricité à partir de chaque énergie primaire, sont présentés. Le lecteur souhaitant plus d'informations sur les facteurs constants des CNE qui sont utilisés dans les calculs ou les données sur lesquelles les calculs sont basés, peut se référer aux annexes 2 et 3 respectivement. En conclusion du chapitre, les intensités d'EE calculées sont comparées et commentées. Les principales critiques et incertitudes concernant les résultats sont indiquées et quelques calculs sur base d'hypothèses alternatives sont avancés.

1 Représentation de l'électricité issue de différentes énergies primaires dans l'Empreinte écologique

1.1 L'électricité issue des énergies fossiles

L'espace nécessaire à l'extraction, l'absorption des déchets solides et la production de l'énergie fossile est relativement modeste : 3,2 ha/MW . Les impacts de la consommation énergétique sont néanmoins beaucoup plus importants : l'EE des émissions de dioxyde de carbone liées à l'opération, à la construction et à l'entretien d'une centrale au charbon typique est estimée à 1.900 ha_g/MW par certains auteurs et celle liée à une usine de gaz naturel de taille similaire à 1.050 ha_g/MW . Différentes approches ont été proposées pour calculer l'Empreinte des énergies fossiles. Elles dépendent de la perspective qu'on adopte : l'absorption des déchets, le maintien de l'apport énergétique ou le maintien de la ressource (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5; Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999).

La méthode de la substitution renouvelable (*Renewable Substitution Method*)

Cette méthode se fonde sur l'idée du maintien du stock d'énergie, ce qui implique que l'épuisement des combustibles fossiles serait compensé par d'autres stocks d'énergie équivalents. Le stock d'énergie à long terme le plus généralisé que la biosphère fournit, est l'accumulation d'énergie dans le bois. Cette source d'énergie est directement utilisable sans intervention et constitue la source la plus utilisée par les sociétés humaines jusqu'à présent. Ainsi, cette méthode permet de faire une estimation de la surface nécessaire à fournir l'équivalent de l'énergie des combustibles fossiles en bois-énergie. En moyenne, une forêt produit approximativement 40 GJ/ha_a/an, dont une grande partie est perdue par décomposition, mangée par des herbivores ou constituée de racines, feuillage, ou d'autres sources peu appropriées à la combustion. Pour estimer la production du bois, l'EE du bois-net est calculée et multipliée par un facteur d'expansion qui permet d'inclure la partie du bois qui est également utilisable pour le bois de chauffage (écorces, branches, petits arbres...) (Wackernagel & Monfreda 2004, pp.5-6; Boutaud & Gondran 2009, pp.74-75).

Des variations de cette méthode décrivent la surface nécessaire en biomasse cultivée, comme le panic érigé, l'éthanol ou le méthanol dérivé de l'agriculture ou de la foresterie, au lieu de bois-énergie. Idéalement, les différentes catégories d'utilisation des énergies fossiles seraient identifiées et une forme de substitution appropriée leur serait attribuée (Boutaud & Gondran 2009, pp.74-75). Andrew Ferguson défend une technique en estimant un bouquet approprié de sources d'énergie renouvelables : les panneaux photovoltaïques, les éoliennes onshore et offshore, l'éthanol issu de biomasse... La composition du bouquet inclut les restrictions de l'énergie éolienne liées à la disponibilité irrégulière et les barrières financières des panneaux photovoltaïques (Wackernagel & Monfreda 2004, p.6).

Cette approche semble être très pertinente : lorsque la production d'énergie fossile faiblira, les tensions entre différentes utilisations des sols productifs risquent de s'accroître. Le cas des agrocarburants illustre ce problème. Néanmoins, cette approche nécessite des hypothèses et des projections et implique par conséquent plus d'incertitudes et des appréciations des visions du futur (Boutaud & Gondran 2009, p.75).

La régénération des vecteurs d'énergie fossile (*Fossil Carrier Regeneration*)

Cette approche considère les combustibles fossiles comme des ressources renouvelables à un rythme très lent, limité par les taux de sédimentation et d'accumulation. L'utilisation de ces combustibles est estimée durable seulement si les stocks dans la lithosphère ne sont ni diminués, ni transférés vers l'atmosphère. Ainsi, la méthode fournit une estimation de la surface nécessaire pour continuer à consommer des combustibles fossiles à l'infini. L'EE calculée par cette méthode serait de 100 ha_a/personne, ce qui représente 50 fois la biocapacité mondiale et est 100 fois supérieure à l'EE de la séquestration de carbone ou de la substitution par bois-énergie (Wackernagel & Monfreda 2004, p.6).

La méthode de l'assimilation des déchets (*Waste Assimilation Method*)

La méthode la plus appliquée part de l'hypothèse que la plus importante restriction sur l'utilisation des combustibles fossiles est la capacité de la biosphère d'absorber les émissions de dioxyde de carbone. Elle estime l'extension de la biosphère nécessaire à absorber les émissions de dioxyde de carbone dépassant un niveau qui permet une stabilisation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. La plupart des comptes calculent cette surface en estimant la forêt supplémentaire nécessaire pour séquestrer ces émissions (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5).

Une partie des émissions de dioxyde de carbone issues des combustibles fossiles est séquestrée par les puits de carbone, notamment les océans, les sols et les forêts. Etant donné que le temps de résidence du carbone est beaucoup plus court dans les puits terrestres que dans les puits océaniques, que le carbone reflète une élimination préalable de biomasse et est susceptible d'être réémis par l'utilisation des terres et les changements climatiques, les comptes actuels ne déduisent que la partie des émissions séquestrée par l'océan de l'EE. Bien qu'il existe des méthodes de séquestration artificielle, on utilise la réversion des surfaces terrestres transformées par l'homme – terres cultivées, pâturages, terres bâties – vers les forêts pour calculer l'EE. Ainsi on vise à représenter au mieux les capacités de séquestration de la biosphère sans la gestion de l'homme. Un ratio moyen de séquestration du carbone est déterminé à partir du guide méthodologique du GIEC (Boutaud & Gondran 2009, pp.75-76; Wackernagel & Monfreda 2004, p.5).

Le désavantage de cette approche est que l'EE liée aux consommations d'énergies fossiles est une sorte d'Empreinte « fictive », qui pourrait induire au leurre que planter des forêts est la solution aux problèmes liés aux émissions de CO₂. Il n'y a néanmoins pas assez d'espace pour planter les forêts nécessaires. De plus, la méthode de l'assimilation des déchets fournit une estimation optimiste de la surface bioproductive nécessaire pour absorber les émissions de dioxyde de carbone, vu qu'elle ne tient pas compte de la probabilité que la capacité de séquestration diminue après 30 à 50 ans, en raison du vieillissement des forêts replantées (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5; Boutaud & Gondran 2009, pp.76-77). Wackernagel et Monfreda insistent sur le fait que cette méthode ne suggère pas que le problème des concentrations croissantes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère peut être résolu par la séquestration à elle seule. Elle démontre plutôt que la biosphère ne fournit pas assez de capacité de séquestration et que c'est très improbable d'arriver à stabiliser les concentrations de dioxyde de carbone atmosphériques sans diminuer les émissions (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5).

Une version alternative de cette approche consisterait à calculer la quantité de surface bioproductive moyenne mondiale nécessaire, tout types de sol confondus, pour séquestrer les émissions de carbone anthropogéniques. Cette approche serait plus réaliste, puisque d'autres types de sol que la forêt ont également des capacités de séquestration de carbone (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999).

D'autres méthodes ont été proposées, telles que le calcul des hectares globaux nécessaire pour produire la

biomasse incorporée dans une quantité de combustibles fossiles donnée, ou le calcul des changements de superficie et de production de surfaces bioproductives liés aux scénarios de changements climatiques, avec l'allocation d'une partie de ces changements en productivité aux émissions de carbone actuelles (Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999). La méthode de l'assimilation des déchets a été retenue pour le calcul des CNE, vu qu'elle se fonde sur des faits et dans une moindre mesure sur des projections et des hypothèses. L'EE des énergies fossiles est, de plus, sensiblement plus faible avec cette méthode et garantit ainsi le principe de sous-estimation systématique (Boutaud & Gondran 2009, p.78).

1.2 L'électricité issue de l'énergie nucléaire

Le calcul de l'EE de l'énergie nucléaire n'est pas simple, vu que la biocapacité qu'elle occupe actuellement est incertaine et spéculative. La surface occupée par l'extraction, la production et l'assimilation des déchets de l'énergie nucléaire est, comme pour les combustibles fossiles, relativement limitée : 0,4 ha/MW. En soi, l'énergie nucléaire ne pose pas de grandes pressions sur la capacité bioproductive. Par conséquent, certaines études traitent l'Empreinte nucléaire comme négligeable ou ajoutent ces demandes sous les catégories des terres bâties ou de l'Empreinte carbone. Néanmoins, en cas d'émission de matières radioactives, qu'elle soit intentionnée ou accidentelle, de grandes surfaces bioproductives peuvent être rendues inutilisables pour l'homme pendant de longues périodes. L'accident de Tchernobyl, par exemple, a entraîné la perte d'une grande quantité de produits agricoles et a rendu inutilisables pour plusieurs générations les surfaces autour des réacteurs dans les zones d'exclusion. L'EE de l'énergie nucléaire pourrait alors être plus importante que celle de l'énergie fossile (Wackernagel et al. 2004, p.6; Wackernagel, Lewan, et al. 1999, p.609; Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999).

A part le problème des déchets toxiques et non assimilables par les écosystèmes, l'énergie nucléaire utilise également des matières premières non renouvelables. Comme pour les combustibles fossiles, la méthode de l'assimilation des déchets ou celle de la substitution renouvelable pourraient être considérées. Néanmoins, étant donné que les déchets nucléaires ne sont pas censés être émis dans la biosphère et ne sont pas assimilables par les écosystèmes et que l'énergie nucléaire n'émet pas directement du CO₂ au stade de production de l'électricité, la méthode d'assimilation des déchets n'est pas directement applicable. Afin de ne pas favoriser l'énergie nucléaire et d'utiliser une approche en cohérence avec celle des énergies fossiles, la plupart des études utilisent alors, comme première estimation pour l'Empreinte nucléaire, l'Empreinte de l'énergie équivalente issue de combustibles fossiles (Wackernagel et al. 2004, p.6; Wackernagel, Lewan, et al. 1999, p.609; Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999; Boutaud & Gondran 2009, p.77).

De 2000 à 2006, les CNE utilisaient également cette méthode pour estimer l'Empreinte nucléaire. Son estimation était alors égale à la production thermique d'électricité à partir d'énergies fossiles carbonées. En 1999, l'Empreinte nucléaire constituait 4% de l'EE mondiale. Pour la Belgique et le Luxembourg (qui étaient

agrégés auparavant), elle constituait 13% de l'Empreinte totale. En réponse aux nombreuses critiques, le GFN a néanmoins décidé de ne plus intégrer l'Empreinte nucléaire dans les CNE. A partir de l'édition de 2008, elle a été supprimée des CNE par manque d'une méthode de calcul scientifiquement défendable. Par contre, en cohérence avec la méthode de calcul actuelle, les conséquences d'un accident nucléaire éventuel sont bien incluses dans les calculs, mais seulement au cas où elle se produisent effectivement. Elle se traduisent alors en termes d'une diminution de surface bioproductive (Boutaud & Gondran 2009, p.77; Kitzes, Galli, et al. 2009, p.1999; Loh et al. 2002, p.14 et 28; Ewing, Moore, et al. 2010, p.96).

1.3 L'électricité issue des énergies renouvelables

Relativement peu d'études ont été menées sur l'EE des énergies renouvelables. Ceci est dû au fait que la fraction des énergies renouvelables dans l'ensemble des énergies commerciales est très limitée et que les développements technologiques rapides dans ce secteur rendent les généralisations sur le rendement de conversion, l'énergie grise et la durée de vie difficiles (Wackernagel & Monfreda 2004, p.7).

L'énergie hydraulique

L'EE de l'énergie hydraulique est constituée par la surface inondée par le réservoir créé par le barrage et l'énergie grise contenue dans le barrage. Elle contient également la productivité biologique perdue à cause du barrage, premièrement l'épuisement des stocks de poissons. Le rapport de la production énergétique et la surface inondée varient fortement (Wackernagel & Monfreda 2004, p.7). Faute de données suffisamment précises, la productivité énergétique est considérée comme équivalente à la moyenne mondiale pour les barrages de plaine. Dans de nombreux pays, les données sur les zones inondées ne sont pas disponibles, mais il existe des données sur la quantité d'électricité produite. Un facteur de conversion est alors utilisé. L'Empreinte hydraulique est calculée selon l'équation suivante:

$$EE_{\text{hydro}} = \text{énergie (GJ)} / \text{facteur de conversion constant (GJ/ha)} * FEQ_{\text{hydro}} (\text{ha}_g/\text{ha})$$

Si les équipements hydroélectriques se situent dans des zones montagneuses, l'EE est parfois diminuée d'un facteur 10 afin de refléter leur moindre impact (Boutaud & Gondran 2009, pp.71-72).

L'énergie éolienne, solaire photovoltaïque, thermique, géothermique et houlomotrice

L'énergie grise contenue dans l'infrastructure extensive, nécessaire pour capturer une source d'énergie diffuse et intermittente, constitue la plus grande partie de l'EE de l'énergie éolienne. Le cas de l'énergie photovoltaïque est similaire. L'énergie grise contenue dans les systèmes photovoltaïque est par contre plus

importante que pour l'énergie éolienne (Wackernagel & Monfreda 2004, pp.7-8).

Les concepteurs de l'EE n'ont pas explicitement visé l'énergie solaire thermique, l'énergie géothermique et l'énergie houlomotrice. Néanmoins, le même raisonnement s'applique à ces énergies : elle se traduisent en EE en termes de terrains bâtis et énergie grise nécessaires à l'emplacement et à la création des infrastructures.

La biomasse

Les concepteurs de l'EE ne décrivent pas explicitement l'impact de l'énergie issue de la biomasse sur l'EE. Néanmoins la culture, l'extraction et le traitement de la biomasse implique également des impacts environnementaux importants, tels que l'utilisation des engrais et des pesticides ou des combustibles fossiles. La production de biomasse à grande échelle nécessite des terres cultivées et peut provoquer la dégradation des terres, l'eutrophisation des nappes phréatiques ou des eaux de surface et la fragmentation des écosystèmes (Weiss & Patel 2007, p.138). En termes d'EE ces impacts se traduisent en terres cultivées nécessaires à la production des cultures énergétiques et des forêts nécessaires à la production du bois-énergie, ainsi que l'Empreinte carbone liée à la production et le transport du combustible, les émissions lors de la combustion éventuelle et, le cas échéant, le traitement des déchets. Finalement les infrastructures nécessaires aux traitements des combustibles à partir de la biomasse doivent également être incluses comme terrains bâtis. Les effets négatifs de l'utilisation des pesticides et des engrais ne figurent que dans l'EE au moment où ils provoquent effectivement une diminution de terres bioproductives et/ou une baisse des rendements, menant à une baisse de la biocapacité.

Tableau 2 synthétise la représentation des différents systèmes énergétiques dans l'EE.

Tableau 2: Représentation des différents systèmes énergétiques dans l'EE

Energie	Terres cultivées	Empreinte carbone	Terrains bâtis	Forêts
Fossile	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de la combustion + énergie grise contenu dans les infrastructures + énergie grise liée à l'opération	Infrastructures	-
Nucléaire*	-	Equivalent du forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de la combustion des énergies fossiles + énergie grise contenu dans les infrastructures + énergie grise liée à l'opération	Infrastructures	-
Hydraulique	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures + surface inondée (surface moyenne mondiale (FEQ = 1))	-
Eolienne	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures	-
Solaire photovoltaïque	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures	-
Biomasse	Cultures énergétiques	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de la combustion + énergie grise contenu dans les infrastructures + énergie grise liée à l'opération	Infrastructures	Bois-énergie
Solaire thermique	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures	-
Géothermique	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures	-
Houlomotrice	-	Forêt nécessaire à l'assimilation du CO ₂ issu de l'énergie grise contenu dans les infrastructures	Infrastructures	-

* Depuis l'édition 2008, l'Empreinte nucléaire n'est plus incluse dans les CNE

2 L'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires

Pour déterminer l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires, j'utiliserai la méthode par composants. Je me limiterai aux énergies primaires importantes pour la Belgique : le gaz naturel, le charbon¹⁰, l'énergie nucléaire, hydraulique, éolienne et solaire et la biomasse.

Pour des raisons de comparabilité, je calculerai à chaque fois l'EE liée à la production d'un TWh_e. Je déterminerai les infrastructures nécessaires sur base de la capacité qui permet de produire ce TWh_e en un an, tenant compte du nombre moyen d'heures opérationnelles. Afin de prendre en compte l'énergie grise incorporée dans les infrastructures de façon équilibrée, je calculerai d'abord l'énergie incorporée dans les

¹⁰ Pour les énergies fossiles, le gaz naturel était la source la plus importante en 2007, suivi par le charbon et les produits pétroliers (respectivement 74%, 23% et 3%) (Eurostat 2010, p.27).

matériaux et l'énergie directe nécessaires à leur construction. Puis je diviserai cette quantité d'énergie par la durée de vie des infrastructures.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet à la fois de comparer des différences en termes de CO₂ émis, mais également en termes de surface et d'énergie grise nécessaire aux infrastructures. Le désavantage de cette méthode est que les données disponibles sont souvent calculées par rapport à une autre capacité ou production annuelle et ont dû être converties. Cette conversion implique des hypothèses sur la réduction relative d'énergie et des matériaux nécessaires à la construction. Je suppose ici qu'une diminution en capacité entraîne une diminution équivalente en matériaux et en énergie grise nécessaire à la construction des infrastructures. Cette hypothèse de rapport linéaire entraîne probablement une sous-estimation des matériaux et de l'énergie grise nécessaires à la construction, vu les économies d'échelle. Probablement, certaines centrales souffriraient d'une perte de rendement suite à une diminution de taille.

Dans les CNE, l'Empreinte nucléaire était calculée comme l'équivalent de l'Empreinte liée à la génération de la même quantité d'énergie sur base d'énergies fossiles. Depuis l'édition 2008, l'Empreinte nucléaire n'est plus incluse dans les CNE, à cause des controverses méthodologiques trop importantes. Ici, je calculerai l'Empreinte nucléaire sur base des mêmes composants que l'Empreinte des énergies fossiles, mais j'utiliserai des données d'ACV concernant les centrales nucléaires. Il faut néanmoins garder à l'esprit que l'EE néglige des impacts environnementaux importants liés à l'énergie nucléaire, tels que le risque d'un accident majeur ou la gestion des déchets (voir 'L'électricité issue de l'énergie nucléaire', p.54).

2.1 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue des énergies fossiles

L'EE liée à la production d'électricité sur base des énergies fossiles est constituée des terrains bâtis nécessaires à accueillir les infrastructures, de l'Empreinte carbone de l'énergie grise liée à la construction des infrastructures (N3), de l'Empreinte carbone liée à l'extraction, le transport et le traitement des combustibles (N1) et de l'Empreinte carbone liée à la combustion des combustibles (N2).

Les centrales thermiques sur base du gaz naturel

Pour calculer l'énergie nécessaire à la construction d'une centrale thermique sur base de gaz naturel (N3), je me baserai sur une étude japonaise du National Institute for Resources and Environment de 1997 qui a déterminé l'énergie grise contenue dans les matériaux et l'énergie directe nécessaire à la construction d'une centrale type d'une capacité de 1000 MW, avec une production annuelle de 6,34 TWh (Tahara et al. 1997). Malgré que cet article n'est pas récent, les données sont toujours reprises dans le dernier rapport du GIEC, ainsi que par Wackernagel et Rees. Pour des raisons de cohérence des calculs présentés, j'appliquerai

néanmoins les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC (GIEC 2006), au lieu des facteurs proposés dans l'article (voir Tableau 3 et Tableau 48 en annexe 2).

Tableau 3: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une centrale thermique sur base de gaz naturel

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ¹¹
Energie				
Electricité	8,9 TWh	-	592 ktCO ₂ / TWh	5.269
Charbon	12 kt	25,8	94,6 tCO ₂ /TJ	29
Pétrole	0,3 kt	42,3	73,3 tCO ₂ /TJ	0,9
Matériaux				
Acier	51 kt	25	0,06 tCO ₂ /GJ	77
Béton	71 kt	9	0,06 tCO ₂ /GJ	39
Aluminium	0,2 kt	226	0,06 tCO ₂ /GJ	4
Total				5.418

Source : Tahara et al. 1997, p.S616, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

La durée de vie d'une centrale thermique sur base de gaz naturel est estimée à 30 ans (voir Tableau 51 en annexe 3) (Sathaye et al. 2011, p.34). Pour calculer l'EE pour la production d'un TWh_e sur une année, les émissions liées à la construction de la centrale doivent être redistribuées de façon équitable sur la durée de vie totale de la centrale. Etant donnée qu'il s'agit d'une centrale avec une production annuelle de 6,34 TWh_e, ce chiffre est ensuite divisé par 6,34 pour obtenir les émissions liées à la production annuelle d'un TWh_e. L'impact annuel est alors égal à 28 ktCO₂¹².

La surface des terrains bâtis nécessaires à l'extraction, l'assimilation des déchets et la production d'énergie est estimée à 3,2 ha/MW (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5). La production d'un TWh_e/an nécessiterait une capacité de 158 MW¹³. La surface occupée par une telle centrale est alors de 505 ha¹⁴.

Pour calculer les émissions de CO₂ liées à la combustion du gaz naturel, ainsi que son énergie grise, je me baserai sur des coefficients d'émission de CO₂ calculés par la Commission Wallonne pour l'Energie (CWaPE). Ces coefficients contiennent les émissions de CO₂ issues de la combustion (N2) ou de la préparation du combustible, soit la production, le conditionnement, le transport et éventuellement le traitement des déchets (N1) (voir Tableau 49 en annexe 3) (CWaPE 2010a, p.5). Il faudrait d'abord calculer le gaz naturel nécessaire à la production d'un TWh_e. J'utiliserai les rendements publiés par la CREG en 2005

11 Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone de l'énergie primaire mondiale (0,06 tCO₂/TJ)

12 $5.417.775,08 \text{ tCO}_2 / (30 \text{ ans} * 6,34 \text{ TWh}) = 28.484,62 \text{ tCO}_2 (\text{an} * \text{TWh})^{-1}$

13 $1000 \text{ MW} / 6,34 = 157,73 \text{ MW}$

14 $3,2 \text{ ha} / \text{MW} * 157,73 \text{ MW} = 504,74 \text{ ha}$

(voir Tableau 50 en annexe 3). Les centrales de référence belge sont des centrales TGV (turbine gaz vapeur, à cycle combiné), qui ont un rendement de 54% (CWaPE 2005, p.4; CREG 2005, p.54). Pour produire 1 TWh_e, il faudrait donc 1,85 TWh_p¹⁵ de gaz naturel. Les émissions de CO₂ liées à cette production s'élèvent alors à 464 ktCO₂¹⁶.

Tableau 4: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base du gaz naturel

Composant	Emissions (ktCO ₂)	Surface (ha)	FR (ha _m /ha ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ ¹⁷ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	505	2,89	2,51	3,66 ¹⁸
N3: énergie grise infrastructures	28	-	3,59 ¹⁹	1,26	7,80 ²⁰
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	464	-	3,59	1,26	127 ²¹
Total	493				139

Source : calculs propres

Ainsi, la production d'un TWh_e sur base du gaz naturel implique l'émission d'environ 500 ktCO₂ et une EE d'environ 140 * 10³ ha_g. Les émissions de CO₂ obtenues ainsi restent dans le même ordre de grandeur que les résultats d'une étude ACV de Voorspools et al. Dans cette étude Voorspools et al. comparent les émissions de CO₂ (N1+N2+N3) des centrales sur base de gaz naturel et de charbon aux centrales nucléaires, aux installations solaires PV et aux installations éoliennes en Belgique pour l'année 1996. Voorspools obtient un résultat de 380 ktCO_{2eq}/TWh_e pour les centrales à gaz naturel (Voorspools et al. 2000, p.324).

Dans son dernier rapport, le GIEC a rassemblé des données de nombreuses études sur le rapport énergétique et le temps de retour énergétique de différentes technologies de production d'électricité (voir Tableau 51) (Sathaye et al. 2011, p.34). J'utiliserai ces données pour une deuxième vérification des calculs de N3 présentés ci-dessus. Le rapport énergétique est le rapport entre l'énergie produite durant toute la durée de vie d'une centrale et l'énergie nécessaire à la construction, le maintien et l'opération de cette centrale. Un rapport élevé indique par conséquent une bonne performance. Le temps de retour énergétique est le temps opérationnel d'une technologie nécessaire à couvrir l'énergie nécessaire à sa construction, son opération et son déclassement.

A partir de ces valeurs il est possible de calculer l'énergie nécessaire à la construction, le maintien et l'opération d'une centrale. En multipliant ce chiffre par l'intensité carbone, on obtient une valeur qui devrait être plus ou moins égale à N3. Pour des raisons de cohérence, j'utiliserai l'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale comme déterminée par les CNE, édition 2010 : 0,06 tCO₂/GJ (= 0,216 tCO₂ / MWh_p).

J'utiliserai la moyenne des valeurs recensées par le GIEC pour les centrales à cycle combiné. Le temps de

15 1 TWh_e / 0,54 TWh_e(TWh_p)⁻¹ = 1,85 TWh_p

16 (251 kgCO₂(MWh)⁻¹ * 1,85 * 10⁶ MWh) = 464.350.000 kgCO₂ = 464.350 tCO₂

17 Voir Tableau 47

18 504,75 ha * 2,89 ha_m / ha * 2,51 ha_g / ha_m = 3.661,33 ha_g

19 FR = Facteur de séquestration de carbone / Rapport de C à CO₂ = 0,97 tC(ha*an)⁻¹ / 0,27 tC(tCO₂)⁻¹ = 3,59 tCO₂(ha*an)⁻¹

20 [(28.484,62 tCO₂(an)⁻¹ * (1-0,22)) / (3,59 tCO₂ (ha*an)⁻¹)] * 1,26 ha_g(ha)⁻¹ = 7.797,96 ha_g (où 0,22 = fraction d'absorption par les océans)

21 [(464.350 tCO₂(an)⁻¹ * (1-0,22)) / (3,59 tCO₂ (ha*an)⁻¹)] * 1,26 ha_g(ha)⁻¹ = 127.120,66 ha_g

retour énergétique moyen est alors 2,4 ans et le rapport énergétique moyen $5,6 \text{ kWh}_e / \text{kWh}_p$. En se basant sur le rapport énergétique moyen, N3 pour la production d'un TWh_e par an serait alors égal à 39 ktCO_2^{22} . Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 17 ktCO_2^{23} pour une production annuelle d'un TWh_e , un chiffre plus optimiste que le résultat sur base du rapport énergétique moyen. En interprétant ces résultats, il faut garder à l'esprit que le temps de retour énergétique est biaisé pour les énergies fossiles, qui nécessitent relativement peu d'investissements énergétiques pour leur construction, mais qui ont des besoins importants en énergie lors de l'opération. Le temps de retour énergétique peut par conséquent être relativement court, tandis que le rapport énergétique, qui couvre toute la durée de vie d'une centrale, reste relativement bas (Gagnon 2008, p.3317; Sathaye et al. 2011, p.33)

Les résultats obtenus sont cohérents avec le résultat calculé ici.

Les centrales thermiques sur base du charbon

Pour calculer l'énergie nécessaire à la construction d'une centrale thermique sur base de charbon, je me baserai à nouveau sur l'étude de Tahara et al. (Tahara et al. 1997) et j'appliquerai les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité de carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC (GIEC 2006). L'étude de Tahara analyse une centrale d'une capacité de 1.000 MW et une production annuelle de $6,08 \text{ TWh}_e$. A nouveau, l'impact total est divisé par la durée de vie totale de la centrale, qui équivaut 30 ans, et par 6,08 (voir Tableau 4) (Sathaye et al. 2011, p.34). L'impact annuel pour une production d'un TWh_e s'élève alors à 43 ktCO_2^{24}

La surface des terrains bâtis nécessaires à l'extraction, l'assimilation des déchets et la production d'énergie est également estimée à $3,2 \text{ ha} / \text{MW}$ (Wackernagel & Monfreda 2004, p.5). Pour produire 1 TWh_e par an, il faudrait une capacité de 164 MW^{25} , ce qui impliquerait une surface de 526 ha^{26} .

22 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e / 5,55 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1}) = 38.918,92 \text{ tCO}_2$

23 $(216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e * 2,4 \text{ ans})) / 30 \text{ ans} = 17.280,00 \text{ tCO}_2$

24 $7.753.649,47 \text{ tCO}_2 / 30 \text{ ans} * 6,08 \text{ TWh} = 42.509,04 \text{ tCO}_2 / \text{an} * \text{TWh}$

25 $1000 \text{ MW} / 6,08 = 164,47 \text{ MW}$

26 $3,2 \text{ ha} / \text{MW} * 164,47 \text{ MW} = 526,30 \text{ ha}$

Tableau 5: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une centrale électrique sur base de charbon

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ²⁷
Energie				
Electricité	13 TWh	-	592 ktCO ₂ /TWh	7.518
Charbon	14 kt	25,8	94,6 tCO ₂ /TJ	35
Pétrole	0,7 kt	42,3	73,3 tCO ₂ /TJ	2
Matériaux				
Acier	62 kt	25	0,06 tCO ₂ /GJ	93
Béton	178 kt	9	0,06 tCO ₂ /GJ	96
Aluminium	0,6 kt	226	0,06 tCO ₂ /GJ	8
Total				7.754

Source : Tahara et al. 1997, p.S616, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

Pour calculer les émissions de CO₂ liées à la combustion du charbon, ainsi que son énergie grise, je me baserai à nouveau sur les coefficients d'émission de CO₂ calculés par la CWaPE (voir Tableau 49 en annexe 3) et les rendements annuels recensé par la CREG (voir Tableau 50 en annexe 3). Actuellement, la plupart des centrales existantes sont du type subcritique, ayant un rendement de 38% (CREG 2005, p.53). Pour produire 1 TWh_e il faudrait donc 2,63 TWh_p de charbon²⁸. Les émissions de CO₂ liées à cette production s'élèvent alors à 1.013 ktCO₂²⁹.

Tableau 6: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base du charbon

Composant	Emissions (ktCO ₂)	Surface (ha)	FR (ha _m /ha ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	526	2,89	2,51	4 ³⁰
N3: énergie grise infrastructures	43	-	3,59	1,26	12 ³¹
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	1.013	-	3,59	1,26	277 ³²
Total	1.055				293

Source : calculs propres

Ainsi la production annuelle d'un TWh_e sur base du charbon implique l'émission d'environ 1.000 ktCO₂ et une EE d'environ 300*10³ ha_g. Les émissions de CO₂ obtenues sont à nouveau relativement cohérentes avec l'étude de Voorspools, qui obtient un chiffre de 880 ktCO_{2eq}/TWh_e (Voorspools et al. 2000, p.324).

27 Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone

28 $1 \text{ TWh}_e / 0,38 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1} = 2,63 \text{ TWh}_p$

29 $(385 \text{ kgCO}_2 / \text{MWh} * 2,63 * 10^6 \text{ MWh}) = 1.012.550.000 \text{ kgCO}_2 = 1.012.550 \text{ tCO}_2$

30 $526 \text{ ha} * 2,89 \text{ ha}_m / \text{ha} * 2,51 \text{ ha}_g / \text{ha}_m = 3.815,55 \text{ ha}_g$

31 $[(42.509,04 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 11.637,29 \text{ ha}_g$

32 $[(1.012.550 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 277.196,14 \text{ ha}_g$

J'utiliserai à nouveau les données du GIEC pour vérifier les calculs de N3 présentés ci-dessus. Le temps de retour énergétique moyen est alors 2,1 ans et le rapport énergétique moyen 11,3 kWh_e / kWh_p pour une centrale à charbon subcritique avancée (voir Tableau 4). En se basant sur le rapport énergétique moyen sur 30 ans, N3 serait alors égal à 19 ktCO₂³³ pour une production annuelle d'un TWh_e. Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 15 ktCO₂³⁴ par an pour une production d'un TWh_e. Ces chiffres diffèrent considérablement des valeurs obtenues ici, bien qu'ils restent dans le même ordre de grandeur. L'écart important entre les valeurs basses et élevées recensées par le GIEC montre déjà un niveau d'incertitude relativement haut, ce qui peut expliquer la différence. De plus, j'ai calculé le rapport énergétique et le temps de retour énergétique moyen. Il est néanmoins possible que les centrales belges se situent plutôt dans les valeurs élevées.

2.2 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie nucléaire

L'EE de l'électricité produite à partir de l'énergie nucléaire comprend les mêmes composants que l'Empreinte de l'électricité sur base des énergies fossiles.

Pour calculer N3, je me baserai sur l'étude ACV de Voorspools et al., mentionnée ci-dessus. Les calculs sont élaborés pour un réacteur de 1000 MW, de type REP (réacteur à eau pressurisée – PWR pressurized water reactor). La durée de vie est estimée à 40 ans et le nombre d'heures opérationnelles est estimé à 7.600 h/an, impliquant une production annuelle de 7,6 TWh (Voorspools et al. 2000, p.315). Comme précédemment, j'appliquerai les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité de carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC, au lieu des facteurs proposés dans l'article (voir Tableau 7). L'article de Voorspools et al. reprend les détails du poids des matériaux nécessaires à la construction d'une centrale nucléaire, mais pas de l'énergie nécessaire à la construction elle-même. Vu l'importance de cette énergie dans les dépenses énergétiques de construction totales, j'estimerai cette énergie en supposant que la construction d'une centrale nucléaire nécessite la même quantité d'énergie que la construction d'une centrale thermique sur base de charbon. A nouveau, l'impact total est divisé par la durée de vie totale de la centrale, qui équivaut 40 ans, et par 7,6. L'impact pour la production annuelle d'un TWh_e s'élève alors à 26 ktCO₂³⁵.

La surface occupée pour l'extraction, la production et l'élimination des déchets de l'énergie nucléaire est estimée à 0,4 ha/MW (Wackernagel & Monfreda 2004, p.6). La capacité nécessaire à la production d'un TWh_e par an est égale à 132 MW³⁶. La surface d'une telle centrale nucléaire s'élève donc à 53 ha.

33 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e / 11,25 \text{ TWh}_e (\text{TWh}_p)^{-1}) = 19.200,00 \text{ tCO}_2$

34 $(216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e * 2,05 \text{ ans})) / 30 \text{ ans} = 14.760 \text{ tCO}_2$

35 $7.960.979,83 \text{ tCO}_2 / (40 \text{ ans} * 7,6 \text{ TWh}_e) = 26.187,43 \text{ tCO}_2 (\text{TWh}_e \cdot \text{an})^{-1}$

36 $1000 \text{ MW} / 7,6 = 131,58 \text{ MW}$

Tableau 7: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une centrale électrique nucléaire

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ³⁷
Energie				
Electricité	13 TWh	-	592 ktCO ₂ / TWh	7.518
Charbon	14 kt	25,8	94,6 tCO ₂ /TJ	35
Pétrole	0,7 kt	42,3	73,3 tCO ₂ /TJ	2
Matériaux				
Acier	60 kt	25	0,06 tCO ₂ /GJ	90
Béton	560 kt	9	0,06 tCO ₂ /GJ	302
Plastic	1 kt	81	0,06 tCO ₂ /GJ	6
Cuivre	0,8 kt	58	0,06 tCO ₂ /GJ	3
Verre	0,7 kt	15	0,06 tCO ₂ /GJ	0,6
Pétrole	0,7 kt	21	0,06 tCO ₂ /GJ	0,9
Aluminium	0,2 kt	226	0,06 tCO ₂ /GJ	3
Total				7.961

Source : Voorspools et al. 2000, p.316, Tahara et al. 1997, p.S616, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

La CWaPe ne fournit pas de coefficients d'émissions de CO₂ qui permettent de calculer N1 et N2 pour l'énergie nucléaire. Je me baserai alors sur une étude de Beerten et al., qui compare les résultats de plusieurs analyses sur l'intensité énergétique des différentes démarches nécessaires à la préparation du combustible nucléaire et à l'opération de la centrale nucléaire (Beerten et al. 2009). Beerten reprend une étude de Lenzen et al. de 2006, concernant l'Australie. Il obtient alors un résultat de 39 gCO₂/kWh_e (Beerten et al. 2009, p.5059). La production d'un TWh_e induirait alors 39 ktCO₂.

Tableau 8: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base d'énergie nucléaire

Composant	Emissions (ktCO ₂)	Surface (ha)	FR (ha _m /ha ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	53	2,89	2,51	0,4 ³⁸
N3: énergie grise infrastructures	26	-	3,59	1,26	7 ³⁹
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	39	-	3,59	1,26	11 ⁴⁰
Total	65				18

Source : calculs propres

La production d'un TWh_e sur base d'énergie nucléaire implique alors l'émission d'environ 70 ktCO₂ et une EE d'environ 20*10³ ha_g. Pour les émissions de CO₂ totales, Voorspools et al. obtiennent une valeur beaucoup plus réduite de 7 ktCO_{2eq}/TWh_e (Voorspools et al. 2000, p.324). Beerten et al. estiment que cette valeur faible

37 Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone

38 $52,63 \text{ ha} * 2,89 \text{ ha}_m / \text{ha} * 2,51 \text{ ha}_g / \text{ha}_m = 381,77 \text{ ha}_g$

39 $[(26.187,43 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 7.169,08 \text{ ha}_g$

40 $[(38.520,00 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 10.545,25 \text{ ha}_g$

est due au cadre limité de l'étude, à la méthode utilisée et au fait que le stockage temporaire et le dépôt finale du combustible nucléaire ne sont pas inclus dans l'étude (Beerten et al. 2009, p.5067).

J'utiliserai à nouveau les données du GIEC pour vérifier les calculs de N3 présentés ci-dessus. Le temps de retour énergétique moyen est 1,9 ans et le rapport énergétique moyen $9,3 \text{ kWh}_e / \text{kWh}_p$ pour une centrale nucléaire à eau légère (voir Tableau 51 en annexe 3). En se basant sur le rapport énergétique moyen sur 40 ans, N3 serait alors égal à 23 ktCO_2^{41} pour une production annuelle d'un TWh_e . Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 10 ktCO_2^{42} par an pour une production d'un TWh_e , un chiffre plus optimiste que le résultat sur base du rapport énergétique moyen. Ces chiffres sont cohérents avec le résultat obtenu ici.

A nouveau, les écarts entre les valeurs basses et élevées recensées par le GIEC sont assez grands, indiquant un niveau d'incertitude important. En interprétant les résultats, il est également important de garder à l'esprit que le temps de retour énergétique n'est pas très adapté pour évaluer la performance des centrales qui nécessitent des investissements énergétiques importants vers leur fin de vie. Le démantèlement des centrales nucléaires exige effectivement beaucoup d'énergie à la fin de la vie de la centrale (Lenzen 2008, p.2179).

2.3 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie hydraulique

Pour calculer l'énergie nécessaire à la construction d'une centrale électrique hydraulique (N3), je me baserai à nouveau sur l'étude de Tahara et al de 1997. Tahara et al. se basent sur une centrale hydraulique d'une capacité de 10 MW, avec une production annuelle de 0,039 TWh (Tahara et al. 1997, p.S616). Comme précédemment, j'appliquerai les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité de carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC (GIEC 2006), au lieu des facteurs proposés dans l'article (voir Tableau 9).

41 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e / 9,25 \text{ TWh}_e (\text{TWh}_p)^{-1}) = 23.351,35 \text{ tCO}_2$

42 $(216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e * 1,9 \text{ ans})) / 40 \text{ ans} = 10.260 \text{ tCO}_2$

Tableau 9: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une centrale électrique hydraulique

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ⁴³
Energie				
Electricité	7,43 GWh	-	592 tCO ₂ / GWh	4
Charbon	6,45 t	25,8	94,6 tCO ₂ /TJ	0,02
Pétrole	1.646,21 t	42,3	73,3 tCO ₂ /TJ	5
Matériaux				
Acier	1.097,4 t	25	0,06 tCO ₂ /GJ	2
Acier inoxydable	7,3 t	25	0,06 tCO ₂ /GJ	0,01
Acier au silicium	30,9 t	25	0,06 tCO ₂ /GJ	0,05
Ciment	7.900,0 t	9	0,06 tCO ₂ /GJ	4
Aluminium	1,0 t	226	0,06 tCO ₂ /GJ	0,01
Cuivre	19,0 t	58	0,06 tCO ₂ /GJ	0,07
Papier	0,2 t	25	0,06 tCO ₂ /GJ	0,3 * 10 ⁻³
Polyéthylène	3,7 t	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,02
Chlorure de polyvinyle	4,0 t	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,02
Isolant	4,2 t	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,02
Huile d'isolation	8,1 t	40	0,06 tCO ₂ /GJ	0,02
Epoxy	0,05 t	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,2 * 10 ⁻³
Total				16

Source : Tahara et al. 1997, p.S617, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

A nouveau, l'impact total est divisé par la durée de vie totale de la centrale, qui équivaut 70 ans (voir Tableau 51 en annexe 3). Pour produire 1 TWh_e par an, il faudrait une capacité de 256 MW⁴⁴. Vu que la centrale actuelle n'a qu'une capacité de 10 MW, l'impact annuel est multiplié par 25,6 pour arriver à une capacité de 256 MW et une production annuelle d'un TWh_e. L'impact total annuel s'élève alors à 6 ktCO₂⁴⁵.

Les CNE déterminent la surface inondée à partir de la production annuelle de la centrale hydraulique. La production annuelle est multipliée par un facteur de rendement mondial fixe (0,077 GWh/ha_m). Selon la méthode de calcul des CNE, la surface inondée est supposée être une surface mondiale moyenne. Le FEQ est par conséquent égal à 1. La surface inondée équivaut alors 13*10³ ha_g (voir Tableau 8). Il n'existent pas de données sur la surface occupée par les autres infrastructures (barrage et centrale électrique), mais leur surface est négligeable par rapport à la surface du réservoir de la centrale et ne sera donc pas prise en considération. Le coefficient d'émission de CO₂ déterminé par la CWaPE pour l'énergie hydraulique est égal à 0 (CWaPE 2010a, p.6). L'EE de l'énergie hydraulique ne comprend par conséquent que la surface nécessaire aux infrastructures et à la surface inondée et l'énergie grise nécessaire à la construction des infrastructures.

43 Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone de l'énergie primaire mondiale (0,06 tCO₂/TJ)

44 10 MW / 0,039 = 256,41 MW

45 (15.644,70 tCO₂ / 70 ans) * 25,64 = 5.730,43 tCO₂ / an

Tableau 10: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base d'énergie hydraulique

Composant	Emissions (ktCO ₂)	Production (Gwh/an)	FR (ha _m /ha ou Gwh/ha _m *an ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	-	2,89	2,51	?
Surface inondée	-	1.000	0,077	1	13 ⁴⁶
N3: énergie grise infrastructures	6	-	3,59	1,26	2 ⁴⁷
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	0	-	3,59	1,26	0,00
Total	6				15

Source : calculs propres

Ainsi, la production d'un TWh_e sur base d'énergie hydraulique implique une émission de 6 ktCO₂ et une EE de 15*10³ ha_g. Afin de vérifier la surface nécessaire à la zone inondée et les infrastructures d'une centrale hydraulique, je me baserai sur une étude de Stöglehner de 2003. Stöglehner a calculé des indices de rendement et d'utilisation de terre pour différentes énergies renouvelables (voir Tableau 52 en annexe 3) (Stöglehner 2003, pp.268 – 269). Partant de ces indices, on obtient une surface de 4*10³ ha⁴⁸, un chiffre très différent du résultat obtenu. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que Stöglehner se base sur la situation Autrichienne, tandis que les CNE se basent sur une valeur mondiale moyenne. Tenant compte du fait qu'une enquête sur 28 centrales hydrauliques en 17 pays révélait des valeurs de production allant de 12 GJ/ha*an jusqu'à 15*10³ GJ/ha*an, l'écart entre les résultats obtenu n'est pas du tout étonnant (Wackernagel & Monfreda 2004, p.7).

Pour la vérification des calculs de N3 présentés ci-dessus, j'utiliserai à nouveau les données du GIEC. Le temps de retour énergétique moyen est 1,8 ans pour une centrale hydraulique et le rapport énergétique moyen 143 kWh_e/ kWh_p (voir Tableau 51). En se basant sur le rapport énergétique moyen sur 70 ans, N3 serait alors égal à 2 ktCO₂⁴⁹ pour une production annuelle d'un TWh_e. Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 6 ktCO₂⁵⁰ par an pour une production d'un TWh_e. Ces chiffres sont cohérents avec le résultat calculé ici. Le grand écart entre les valeurs faibles et élevées recensées par le GIEC, indique néanmoins des incertitudes importantes.

46 $(1.000,00 \text{ Gwh}(\text{an})^{-1} / 0,077 \text{ Gwh}(\text{ha}_m \cdot \text{an})^{-1}) * 1 \text{ ha}_g(\text{ha}_m)^{-1} = 12.987,01 \text{ ha}_g$

47 $[(5.730,34 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} \cdot \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 1.568,77 \text{ ha}_g$

48 $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{an}(\text{MJ})^{-1} * 3,6 * 10^9 \text{ MJ} = 36.000.000 \text{ m}^2 = 3.600,00 \text{ ha}$

49 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (1 \text{ TWh}_e / 143 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1}) = 1.510,49 \text{ tCO}_2$

50 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (1 \text{ TWh}_e * 2,05 \text{ ans}) / 70 \text{ ans} = 6.325,71 \text{ tCO}_2$

2.4 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie éolienne

Pour calculer l'énergie nécessaire à la construction d'une installation éolienne (N3), je me baserai sur une étude de Pacca et Horvath de 2002. Cette étude compare les coûts et les investissements énergétiques pour différents modes de production d'électricité et se base en grande partie sur l'étude de Tahara et al. Pacca et Horvath complètent l'étude de Tahara et al. avec l'analyse d'une installation éolienne d'une capacité de 3 GW, avec une production annuelle de 5,55 TWh (Pacca & Horvath 2002, p.3197). Comme précédemment, j'appliquerai les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité de carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change 2006), au lieu des facteurs proposés dans l'article (voir Tableau 11).

Tableau 11: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une installation éolienne

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ⁵¹
Energie				
Electricité	2 TWh	-	592 ktCO ₂ / TWh	1.001
Matériaux				
Acier	290 kt	25	0,06 tCO ₂ /GJ	435
Béton	1.266 kt	9	0,06 tCO ₂ /GJ	684
Aluminium	6 kt	226	0,06 tCO ₂ /GJ	85
Cuivre	2 kt	58	0,06 tCO ₂ /GJ	5
Plastic	20 kt	80	0,06 tCO ₂ /GJ	97
Verre	5 kt	15	0,06 tCO ₂ /GJ	4
Huile	0,5 kt	21	0,06 tCO ₂ /GJ	0,6
Sable	9 kt	0	0,06 tCO ₂ /GJ	0,00
Total				2.313

Source : Pacca & Horvath 2002, p.3197, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

A nouveau, l'impact total est divisé par la durée de vie totale de la centrale, qui équivaut 25 ans (voir Tableau 51 en annexe 3). Puis l'impact annuel est divisé par 5,55 pour arriver à une production annuelle d'un TWh_e. L'impact total annuel s'élève alors à 17 ktCO₂⁵².

La surface occupée par une installation éolienne est estimée à 1,8 ha_g/MW sur des pâturages d'une qualité moyenne (Wackernagel & Monfreda 2004, p.7). Les infrastructures sont, selon la méthode des CNE, considérées comme des terrains bâtis, ayant le même FR et FEQ que les terres cultivées. Pour des raisons de comparabilité, je convertirai ce chiffre en terrains bâtis. On obtient alors 3,91 ha_m⁵³/MW. Une production

⁵¹ Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone de l'énergie primaire mondiale (0,06 tCO₂/TJ)

⁵² (2.312.549,74 tCO₂ / 25 ans) / 5,55 = 16.667,03 tCO₂ / an

⁵³ 1,8 ha_g(MW)⁻¹ / 0,46 ha_g(ha_m)⁻¹ = 3,91 ha_m(MW)⁻¹

annuelle d'un TWh_e nécessiterait une capacité de 484 MW⁵⁴ et impliquerait alors une surface de 5*10³ ha_g⁵⁵.

Le coefficient d'émission de CO₂ déterminé par la CWaPE pour l'énergie éolienne est égal à 0 (CwaPE 2010, p.6). L'EE de l'énergie éolienne ne comprend par conséquent que la surface nécessaire aux infrastructures et l'énergie grise nécessaire à la construction des infrastructures.

Tableau 12: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base d'énergie éolienne

Composant	Emissions (ktCO ₂)	Surface (10 ³ ha _m)	FR (ha _m /ha ou Gwh/ha _m *an ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	2	-	2,51	5
N3: énergie grise infrastructures	17	-	3,59	1,26	5 ⁵⁶
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	0	-	3,59	1,26	0
Total	17				9

Source : calculs propres

La production d'un TWh_e sur base d'énergie éolienne impliquerait alors l'émission de 17 ktCO₂ et une EE d'environ 10*10³ ha_g. Afin de vérifier la surface nécessaire aux infrastructures d'une installation éolienne, je me baserai à nouveau sur l'étude de Stöglehner de 2003 (voir Tableau 52 en annexe 3). Partant de ces indices, on obtient une surface de 396 ha⁵⁷, un chiffre plus optimiste que l'estimation de Wackernagel et Monfreda. Voorspools arrive à un résultat entre 9 et 28 ktCO₂/TWh, dépendant si l'installation éolienne se trouve à la côte ou à l'intérieur du pays (Voorspools et al. 2000, p.324). Ce résultat est très cohérent avec le résultat obtenu sur base de l'étude de Pacca et Horvath.

Partant des données du GIEC, le temps de retour énergétique moyen est 0,8 ans pour une installation éolienne et le rapport énergétique moyen 22,5 kWh_e / kWh_p (voir Tableau 51 en annexe 3). En se basant sur le rapport énergétique moyen sur 25 ans, N3 serait alors égal à 10 ktCO₂⁵⁸ pour une production annuelle d'un TWh_e. Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 7 ktCO₂⁵⁹ par an pour une production d'un TWh_e. Ces chiffres diffèrent du résultat obtenu, mais restent plus ou moins dans le même ordre de grandeur.

54 $2.688 \text{ MW} / 5,55 = 484,32 \text{ MW}$

55 $484,32 \text{ MW} * 3,91 \text{ ha}_m / \text{MW} * 2,51 \text{ ha}_g / \text{ha}_m = 4.753,16 \text{ ha}_g$

56 $[(16.667,03 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 4.562,77 \text{ ha}_g$

57 $0,0011 \text{ m}^2 * \text{an}(\text{MJ})^{-1} * 3,6 * 10^9 \text{ MJ} = 3.960.000 \text{ m}^2 = 396,00 \text{ ha}$

58 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (1 \text{ TWh}_e / 22,5 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1}) = 9.600,00 \text{ tCO}_2$

59 $(216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (1 \text{ TWh}_e * 0,8 \text{ ans})) / 25 \text{ ans} = 6.912,00 \text{ tCO}_2$

2.5 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de l'énergie solaire photovoltaïque

Pour calculer l'énergie nécessaire à la construction d'une centrale solaire PV (N3), je me baserai à nouveau sur l'étude de Tahara et al de 1997. Tahara et al. se basent sur une installation solaire PV d'une capacité d'un MW, avec une production annuelle de $1,2 * 10^{-3}$ TWh (Tahara et al. 1997, p.S616). Comme précédemment, j'appliquerai les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité de carbone des CNE, édition 2010, et des directives pour le recensement des GES du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change 2006), au lieu des facteurs proposés dans l'article (voir Tableau 13).

Tableau 13: Emissions de CO₂ liées à la construction d'une centrale solaire photovoltaïque

Entrées de construction	Quantité	Energie incorporée selon CNE, édition 2010 ou GIEC (GJ/t)	Intensité carbone selon CNE, édition 2010 ou GIEC	Emissions de CO ₂ (ktCO ₂) selon CNE, édition 2010 ⁶⁰
Energie				
Electricité	1,70 GWh	-	592 tCO ₂ / GWh	1
Charbon	0,03 kt	25,8	94,6 tCO ₂ /TJ	0,07
Pétrole	0,1 kt	42,3	73,3 tCO ₂ /TJ	0,3
Matériaux				
Acier	1 kt	25	0,06 tCO ₂ /GJ	2
Ciment	0,5 kt	9	0,06 tCO ₂ /GJ	0,3
Aluminium	0,04 kt	226	0,06 tCO ₂ /GJ	0,5
Cuivre	0,1 kt	58	0,06 tCO ₂ /GJ	0,4
Silicone	0,05 kt	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,2
Verre	0,2 kt	15	0,06 tCO ₂ /GJ	0,2
Isolant	0,09 kt	80	0,06 tCO ₂ /GJ	0,4
Total				5

Source : Tahara et al. 1997, p.S617, CNE, édition 2010, portant sur l'année 2007 et GIEC 2006, pp. 1.18 et 2.16 (dernière colonne : calculs propres).

A nouveau, l'impact total est divisé par la durée de vie totale de la centrale, qui équivaut 25 ans (voir Tableau 51 en annexe 3). Pour produire 1 TWh_e par an, il faudrait une capacité de 833 MW⁶¹. L'impact annuel est par conséquent multiplié par 833 pour arriver à une production annuelle d'un TWh_e. L'impact total annuel s'élève alors à 167 ktCO₂⁶².

La surface occupée par une installation solaire PV est de 10 ha/MW (Wackernagel & Monfreda 2004, p.8).

La surface nécessaire à une installation de 833 MW serait alors égale à $8*10^3$ ha.

Le coefficient d'émission de CO₂ déterminé par la CWaPE pour l'énergie solaire PV est égal à 0 (CWaPE 2010, p.6). L'EE de l'énergie solaire PV ne comprend par conséquent que la surface nécessaire aux

⁶⁰ Emissions de CO₂ = Poids * énergie incorporé * intensité carbone de l'énergie primaire mondiale (0,06 tCO₂/TJ)

⁶¹ $1 \text{ MW} / (1,2*10^{-3}) = 833,33 \text{ MW}$

⁶² $(5.016,63 \text{ tCO}_2 / 25 \text{ ans}) * 833,33 = 167.220,33 \text{ tCO}_2 / \text{an}$

installations et l'énergie grise nécessaire à la construction de ces installations.

Tableau 14: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base d'énergie solaire photovoltaïque

Composante	Emissions (ktCO ₂)	Surface (10 ³ ha)	FR (ha _m /ha ou Gwh/ha _m *an ou tCO ₂ /ha*an)	FEQ (ha _g /ha _m)	Surface moyenne mondiale (10 ³ ha _g)
Infrastructures	-	8	2,89	2,51	60 ⁶³
N3: énergie grise infrastructures	167	-	3,59	1,26	46 ⁶⁴
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	0,00	-	3,59	1,26	0
Total	167				106

Source : calculs propres

La production d'un TWh_e sur base d'énergie solaire PV implique alors une émission d'environ 170 ktCO₂ et une EE d'environ 100*10³ ha_g. Afin de vérifier la surface des infrastructures d'une centrale solaire PV, je me baserai à nouveau sur l'étude de Stöglehner de 2003 (voir Tableau 52 en annexe 3). Partant de ces indices, on obtient une surface de 8*10³ ha⁶⁵, un chiffre très cohérent aux estimations de Wackernagel et Monfreda. L'étude ACV de Voorspools arrive à un résultat de 60 ktCO₂ par TWh_e (Voorspools et al. 2000, p.324). Sur base des données du GIEC, le temps de retour énergétique moyen est 4,1 ans pour une installation solaire PV et le rapport énergétique moyen 24,1 kWhe / kWhp (voir Tableau 4). En se basant sur le rapport énergétique moyen sur 25 ans, N3 serait alors égal à 9 ktCO₂⁶⁶ pour une production annuelle d'un TWh_e. Partant du temps de retour énergétique, N3 serait égal à 35 ktCO₂⁶⁷ par an pour une production d'un TWh_e. Les différences entre les résultats sont très importants, allant jusqu'à deux ordres de grandeurs. Néanmoins, les différences entre les valeurs basses et élevées obtenues par le GIEC sont également assez importants. Il est probable que le solaire PV en Belgique se situe plutôt dans les valeurs élevées de temps de retour énergétique et connaît un rapport énergétique plutôt faible, vu le climat belge. L'utilisation du temps de retour énergétique moyen et du rapport énergétique moyen pour les calculs, n'est par conséquent pas très adéquate.

63 $8.333,30 \text{ ha} * 2,89 \text{ ha}_m / \text{ha} * 2,51 \text{ ha}_g / \text{ha}_m = 60.448,92 \text{ ha}_g$

64 $[(167.220,33 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha} * \text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 45.778,31 \text{ ha}_g$

65 $0,0023 \text{ m}^2 * \text{an}(\text{MJ})^{-1} * 3,6 * 10^9 \text{ MJ} = 8.280.000 \text{ m}^2 = 8.280,00 \text{ ha}$

66 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (1 \text{ TWh}_e / 24,1 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1}) = 8.962,66 \text{ tCO}_2$

67 $216.000 \text{ tCO}_2 / \text{TWh}_p * (\text{TWh}_e * 4,01 \text{ ans}) / 25 \text{ ans} = 34.646,40 \text{ tCO}_2$

2.6 L'intensité d'Empreinte de l'électricité issue de la biomasse

Pour calculer l'EE des combustibles issus de la biomasse, il faut calculer l'Empreinte carbone liée au cycle de vie du combustible, l'Empreinte des terrains bâtis nécessaire pour les infrastructures requises et la surface de terres cultivées ou de forêts nécessaire à la production de la biomasse.

Les centrales thermiques à la biomasse sont typiquement dix fois plus petites que les centrales au charbon, variant de 1 à 100 MW, dû aux quantités limitées de matière première et aux coûts de transport élevés (IEA 2007, p.2). Partant de la capacité installée et de la production annuelle en Wallonie en 2008 et en 2009, le nombre moyen d'heures opérationnelles est environ 6.500 h/an⁶⁸. Pour produire 1 TWh_e par an, il faudrait alors une capacité d'environ 150 MW⁶⁹.

Pour estimer la surface occupée par les infrastructures requises, je partirai de l'hypothèse que les unités de combustion de biomasse soient comparables aux centrales thermiques au charbon. Je supposerai alors que la surface nécessaire à accueillir les infrastructures soit égale à 3,2 ha/MW. La surface occupée par les infrastructures serait alors de 480 ha⁷⁰. Vu que les centrales à la biomasse n'impliquent pas d'exploitation minière comme le charbon ou d'infrastructures de transport importantes comme le gaz (gazoducs, etc.) cette surface constitue probablement une sur-estimation.

Je suppose également que l'énergie grise nécessaire à la construction des infrastructures et la durée de vie de la centrale soient comparables à celles des centrales à charbon. L'impact pour une production annuelle d'un TWh_e s'élève alors à 39 ktCO₂⁷¹.

Pour calculer N1 et N2, j'utilise à nouveau les coefficients d'émission de CO₂ des sources d'énergie primaires de la CWaPE (CWAPE 2010a, p.5). Les coefficients de CO₂ pour les différentes filières de biomasse diffèrent considérablement (voir Tableau 54 en annexe 3). Je me baserai sur les filières des déchets industriels et municipaux et de la biomasse issue de la sylviculture et ses industries connexes, qui assuraient la production d'électricité la plus importante en Belgique en 2008 (voir Tableau 53 en annexe 3) (IEA 2011).

Pour les déchets industriels et municipaux, N1 et N2 égalent 0, selon la CWaPE. Les déchets industriels et municipaux ne nécessitent pas non plus de surfaces de terres cultivées ou de forêt pour être produits. L'EE d'un TWh_e produit sur base des déchets industriels et municipaux ne comprend par conséquent que les surfaces bioproductives occupées par les infrastructures et l'énergie grise contenue dans les infrastructures.

La quantité de déchets industriels et municipaux reste néanmoins largement insuffisante pour répondre aux besoins croissants. Une projection du VITO estime que les granulés de bois et les autres résidus des industries de bois rempliront 3/4 des besoins en biomasse pour la production d'électricité (Devriendt & Nijs 2007, p.5). Afin de mettre en avant la variation des impacts entre les différentes filières, je baserai mon

68 $((702.682 \text{ MWh} / 96 \text{ MW}) + (559.207 \text{ MWh} / 94 \text{ MW})) / 2 = 6.634,31$

69 $10^6 \text{ MWh} / 6.500 \text{ h} = 153,85 \text{ MW}$

70 $3,2 \text{ ha} / \text{MW} * 150 \text{ MW} = 480 \text{ ha}$

71 $(42.509,04 \text{ tCO}_2 * (150 \text{ MW} / 164,47 \text{ MW})) = 38.769,11 \text{ tCO}_2/\text{an}$

estimation sur le bois cultivé à finalité énergétique. $N1 + N2$ est alors égal à $40 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}_p$. L'utilisation du bois à haute qualité permet d'obtenir un rendement de 40% (tandis que le rendement des centrales typiques à la biomasse varie autour de 30%) (IEA 2007, p.2). Pour produire un TWh_e , il faudrait alors $2,5 \text{ TWh}_p$ ⁷², ce qui impliquerait 100 ktCO_2 ⁷³.

Pour calculer la surface de forêt nécessaire à la production du bois, l'EE se base sur le poids du bois récolté. Pour déterminer ce poids, je me baserai sur le PCI du bois sec, qui est égal à $5,0 \text{ kWh/kg}$ (Huart 2007, p.32). La quantité de bois nécessaire à produire un TWh_e est alors égale à 500 kt ⁷⁴.

Tableau 15: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base de déchets industriels et municipaux

Composant	Emissions (ktCO_2)	Surface (ha)	FR (ha_m/ha ou $\text{tCO}_2/\text{ha}*\text{an}$)	FEQ (ha_g/ha_m)	Surface moyenne mondiale (10^3 ha_g)
Infrastructures	-	480	2,89	2,51	3 ⁷⁵
N3: énergie grise infrastructures	39	-	3,59	1,26	11 ⁷⁶
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	0	-	3,59	1,26	0
Terres cultivées	-	-	-	2,51	-
Forêts	-	-	-	1,26	-
Total	39				14

Source : calculs propres

Ainsi, la production d'un TWh_e sur base des déchets industriels et municipaux impliquerait l'émission d'environ 40 ktCO_2 et une EE d'environ $15*10^3 \text{ ha}_g$.

Tableau 16: Composants de l'EE d'un TWh_e sur base du bois cultivé à des fins énergétiques

Composant	Emissions (ktCO_2)	Production (kt)	Surface (ha)	FR (ha_m/ha ou $\text{tCO}_2/\text{ha}_m*\text{an}$ ou $\text{t}/\text{ha}_m*\text{an}$)	FEQ (ha_g/ha_m)	Surface moyenne mondiale (10^3 ha_g)
Infrastructures	-	-	480,00	2,89	2,51	3
N3: énergie grise infrastructures	39	-	-	3,59	1,26	11
N1 + N2: énergie grise et combustion combustible	100	-	-	3,59	1,26	27 ⁷⁷
Terres cultivées	-	-	-	-	2,51	-
Forêts	-	500	-	3,32	1,26	190 ⁷⁸
Total	139					231

Source : calculs propres

La production d'un TWh_e sur base du bois cultivé à des fins énergétiques implique néanmoins des émissions

72 $1 \text{ TWh}_e / 0,40 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1} = 2,5 \text{ TWh}_p$

73 $2,5 * 10^6 \text{ MWh}_p * 40 \text{ kgCO}_2 / \text{MWh}_p = 100.000.000 \text{ kgCO}_2 = 100.000,00 \text{ tCO}_2$

74 $2,5 * 10^9 \text{ kWh}_p / 5 \text{ kWh}(\text{kg})^{-1} = 500.000.000 \text{ kg} = 500.000,00 \text{ t}$

75 $480,00 \text{ ha} * 2,89 \text{ ha}_m / \text{ha} * 2,51 \text{ ha}_g / \text{ha}_m = 3.481,87 \text{ ha}_g$

76 $[(38.769,11 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha}*\text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 10.613,45 \text{ ha}_g$

77 $[(100.000,00 \text{ tCO}_2(\text{an})^{-1} * (1-0,22)) / (3,59 \text{ tCO}_2(\text{ha}*\text{an})^{-1})] * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha})^{-1} = 27.376,04 \text{ ha}_g$

78 $(500.000,00 \text{ t}(\text{an})^{-1} / 3,32 \text{ t}(\text{ha}_m*\text{an})^{-1}) * 1,26 \text{ ha}_g(\text{ha}_m)^{-1} = 189.759,04 \text{ ha}_g$

beaucoup plus importantes d'environ 140 ktCO₂ et une EE d'environ 230*10³ ha_g. Afin de vérifier la surface nécessaire à la production de bois, je me baserai à nouveau sur l'étude de Stöglehner de 2003. Les indices du rendement et de l'utilisation de terre dans cette étude sont calculés sur base du rendement de l'agriculture et de la foresterie autrichienne et suivant l'hypothèse d'une agriculture et sylviculture extensive et durable (Stöglehner 2003, pp.268 - 269). Si on calcule le nombre d'hectares nécessaires à la production de bois selon ces indices, on obtient une surface de 123*10³ ha⁷⁹, un chiffre très comparable au résultat obtenu (compte tenu du fait que celui-ci est exprimé en hectares globaux, avec un FEQ de 1,26).

Pour la vérification de N3, j'ai jusqu'ici utilisé les données sur le temps de retour énergétique et le rapport énergétique rassemblées par le GIEC dans son dernier rapport. Pour la biomasse, ces données n'ont pas été incluses dans le rapport du GIEC, parce que la littérature disponible sur la biomasse ne documente presque uniquement les émissions des GES et pas le bilan énergétique et concerne surtout la filière des biocarburants (Sathaye et al. 2011, p.34). Malheureusement, une vérification des résultats n'a par conséquent pas été possible.

3 Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires

Tableau 17 et Graphique 8 résument l'EE totale pour la production annuelle d'un TWh_e pour chaque énergie primaire analysée, ainsi que les différents composants de l'EE totale. La génération d'électricité issue d'énergie éolienne présente l'intensité d'EE la plus basse. La production d'électricité issue d'énergie hydraulique, nucléaire et sur base des déchets municipaux et industriels ont des intensités d'EE comparables. Les centrales thermiques au charbon ont l'intensité d'EE la plus élevée : 20 à 25 fois plus grande que celle de l'énergie nucléaire ou hydraulique. L'électricité issue d'énergie solaire PV et les centrales thermiques au gaz naturel ont une position intermédiaire, avec une intensité d'EE considérablement plus faible que celle des centrales au charbon, mais également dix fois plus élevée que celles de l'énergie nucléaire et hydraulique. L'importance de l'intensité d'EE de l'énergie issue du bois-énergie saute à l'oeil. Elle est seulement dépassée par les centrales au charbon.

Une analyse au niveau des composants de l'EE révèle que l'Empreinte carbone liée à l'extraction, au traitement, au transport, à la combustion et à l'élimination du combustible (N1 + N2) constitue plus de 90% de l'EE totale des centrales aux énergies fossiles. Pour la production d'électricité issue des ER, c'est surtout la surface couverte par les infrastructures qui a une contribution importante : elle constitue 50 à 90% de l'EE totale. L'énergie solaire PV surtout nécessite une très grande surface. Pour l'électricité issue de bois-énergie, c'est surtout la surface de forêt qui a un apport considérable de 80% de l'EE totale. Néanmoins, l'Empreinte

⁷⁹ $0,1370 \text{ m}^2 \cdot \text{an}(\text{MJ})^{-1} * 2,5 * 3,6 * 10^9 \text{ MJ} = 1.233.000.000 \text{ m}^2 = 123.300,00 \text{ ha}$

carbone liée à l'exploitation, au traitement et au transport du bois-énergie est également relativement importante, même 2,5 fois plus importante que celle de l'énergie nucléaire. Finalement, l'Empreinte carbone liée à l'énergie incorporée dans les matériaux et à l'énergie directe nécessaire à la construction des installations constitue une importante partie de l'EE totale pour la production d'électricité issue d'énergie éolienne, d'énergie nucléaire et sur base des déchets municipaux et industriels. Pour le solaire PV, cette partie est particulièrement importante, non seulement par rapport à l'EE totale, mais également en termes absolus.

Tableau 17: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires
(en ha_g/TWh_e*an)

Energie	Empreinte carbone N1+N2 (10 ³ ha _g) (%)	Empreinte carbone N3 (10 ³ ha _g) (%)	Terrains bâtis (10 ³ ha _g) (%)	Forêts (10 ³ ha _g) (%)	EE totale (10 ³ ha _g)
Fossile					
Gaz Naturel	127 (92%)	8 (6%)	4 (3%)	-	139
Charbon	277 (95%)	12 (4%)	4 (1%)	-	293
Nucléaire	11 (58%)	7 (40%)	0,4 (2%)	-	18
Hydraulique	0 (0%)	2 (11%)	13* (89%)	-	15
Eolienne	0 (0%)	5 (49%)	5 (51%)	-	9
Solaire photovoltaïque	0 (0%)	46 (43%)	60 (57%)	-	106
Biomasse					
Déchets industriels et municipaux	0 (0%)	11 (75%)	3 (25%)	-	14
Bois-énergie	27 (12%)	11 (5%)	3 (2%)	190 (82%)	231

* Surface inondée

Source : Tableau 4, Tableau 6, Tableau 8, Tableau 10, Tableau 12, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16

4 Discussion des résultats : incertitudes et critiques

Jolia-Ferrier et Villy ont rassemblé dans un livre sur l'EE des estimations de l'intensité d'EE de l'électricité produite par différentes énergies primaires (voir Tableau 55 en annexe 3). Les résultats présentés ici rentrent dans la fourchette des estimations recensées par Jolia-Ferrier et Villy, sauf pour le solaire PV. Néanmoins, les écarts entre les estimations des différentes études sont parfois assez élevés, surtout pour les ER, où ils s'élèvent à un ou même deux ordres de grandeur (Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.127). En effet, l'interprétation des résultats présentés exige une certaine prudence. D'un côté, les résultats des ACV sur lesquels l'analyse est fondée, ne s'avèrent pas toujours cohérents. De l'autre côté, de nombreuses hypothèses et la méthodologie de l'EE influencent également les résultats.

En ce qui concerne les ACV, la comparaison des résultats aux rapports énergétiques et aux temps de retour énergétique publiés par le GIEC a démontré des grandes divergences. Ces divergences s'expliquent probablement en partie par le fait que, par manque d'informations plus précises, j'ai basé mes calculs sur la moyenne des valeurs basses et élevées du rapport énergétique et du temps de retour énergétique recensés par le GIEC (voir Tableau 51 en annexe 3). Cette méthode n'est pas très pertinente, vu qu'il est possible que pour certaines énergies, la Belgique se retrouve systématiquement dans les valeurs basses ou élevées. Pour le solaire PV, par exemple, il est probable que le temps de retour énergétique soit élevé en Belgique et le rapport énergétique bas, à cause des grandes variations d'irradiation solaire.

Néanmoins, les valeurs basses et élevées recensées par le GIEC révèlent déjà souvent des écarts considérables. L'importance des écarts est plus grande pour certains modes de production d'électricité que pour d'autres. Notamment pour le solaire PV, l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique, les écarts sont assez importants. Ceci n'est pas étonnant, étant donné que les ER connaissent un développement technologique rapide. Les généralisations sur les rendements de conversion, l'énergie incorporée et la durée de vie sont alors très difficile (Wackernagel & Monfreda 2004, p.7). Mais, une partie des écarts reflète également des différences méthodologiques et des hypothèses de base. Finalement, les conditions locales peuvent également avoir une influence importante.

Voorspools et al. ont effectué une analyse sur les ACV concernant le solaire PV. Cette étude démontre que la comparabilité des ACV est fortement entravée par plusieurs facteurs. La délimitation du système étudié influence fortement les résultats : certaines études incluent par exemple la structure de soutien et les équipements nécessaires pour les panneaux PV, tandis que d'autres se limitent aux panneaux PV. Ensuite l'énergie nécessaire à la production des panneaux PV est parfois exprimée en énergie électrique et parfois en énergie primaire. Puis, la performance est parfois calculée sous des conditions standard, tandis que d'autres études utilisent la performance dans des conditions réelles. Finalement les hypothèses sur le bouquet énergétique pour la production d'électricité influencent également les résultats, ainsi que les conditions climatiques. Vu que l'irradiation solaire et le vent sont très variables en Belgique, le temps annuel opérationnel est très difficile à estimer (Voorspools et al. 2000, pp.322, 325-328).

Lenzen & Munksgaard font le même constat pour les ACV qui concernent les installations éoliennes. Ils ont comparé les résultats de 72 ACV et identifient également des différences importantes. Les différences sont à nouveau en grande partie dues aux différences méthodologiques, à la délimitation du système étudié et aux hypothèses sur le bouquet énergétique du pays où les composants de l'éolien sont construits et sur la durée de vie (Lenzen & Munksgaard 2002, pp.346-352). Voorspools et al. ont effectivement constaté des variations de plus ou moins 25% pour les estimations de la durée de vie de différentes centrales (Voorspools et al. 2000, p.322).

Les mêmes problèmes sont également soulevés par Voorspools et al. et Beerten pour les centrales nucléaires : l'entretien et la démolition des infrastructures ne sont pas toujours incluses, tandis que l'énergie nécessaire à

la démolition s'avère très importante pour les centrales nucléaires. Les parties radioactives nécessitent un traitement intensif, qui demande entre 30 et 50% de l'énergie qui était nécessaire à leur construction. Pour comparaison : l'énergie nécessaire à la démolition des composants des centrales non nucléaires est estimée à 2% de l'énergie nécessaire à leur construction. Pour le béton, ce pourcentage s'élève à 10%. Puis les estimations sur l'énergie incorporée dans les matériaux et l'énergie grise nécessaire à la construction d'une centrale se font sur base des facteurs d'intensité énergétique généraux. Pourtant les exigences de fiabilité des composants des centrales nucléaires entraînent des démarches supplémentaires dans la construction (tests, contrôles de sécurité...), qui induisent une consommation d'énergie plus élevée. Finalement les hypothèses concernant le bouquet énergétique du pays où les composants sont construits influencent également fortement les émissions de CO₂ au cours de la durée de vie d'une centrale nucléaire (Beerten et al. 2009, p.5057; Voorspools et al. 2000, pp.314-317).

L'influence de tous ces facteurs fait que, actuellement, les différences entre les moyennes d'intensité énergétique et d'intensité carbone des différents vecteurs énergétiques sont parfois plus faibles que celles au sein de chaque vecteur énergétique (Lenzen & Munksgaard 2002, p.356). Il va de soi que ce fait influence fortement la fiabilité des résultats obtenus et rend leur interprétation épineuse.

Pour la production d'électricité issue de l'énergie solaire PV et de l'énergie éolienne, les émissions de CO₂ de N3 constituent un composant très important de l'EE totale. Il est important de rappeler que je me suis basée sur l'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale pour calculer les émissions de CO₂ liées à l'énergie incorporée dans les matériaux et sur le bouquet énergétique retenu dans les études ACV pour calculer celles de l'énergie nécessaire à la construction. Considérer un bouquet énergétique avec une intensité carbone beaucoup plus basse (par exemple celui de la Belgique au lieu de celui du niveau mondial), réduirait fortement l'EE de l'énergie solaire PV et de l'énergie éolienne. En utilisant les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité carbone des CNE et du GIEC, d'autres problèmes méthodologiques surviennent également : d'une part la précision des données est limitée. Les estimations d'énergie incorporée sont faites sur base des catégories de matériaux. Néanmoins, le type de produits ainsi que le procédé utilisé, peut avoir une très grande influence sur l'énergie incorporée. D'autre part, les catégories ne sont pas toujours très claires et il est donc possible que certains matériaux soient attribués à une fausse catégorie de produits. Par conséquent, un facteur d'intensité énergétique incorrect est appliqué.

En ce qui concerne les hypothèses et la méthodologie de l'EE, il faut garder à l'esprit que j'ai supposé que l'énergie directe nécessaire à la construction d'une centrale nucléaire et à la construction d'une unité de combustion de biomasse soient équivalentes à celle d'une centrale thermique au charbon. J'ai également supposé que l'énergie incorporée dans les matériaux nécessaires à la construction d'une unité de combustion de biomasse soit équivalente à celle d'une centrale thermique au charbon. Finalement j'ai supposé que la

surface des infrastructures des unités de combustion de biomasse soit équivalente à celle des centrales thermiques aux énergies fossiles. Vu qu'une unité de combustion de biomasse ne nécessite pas d'infrastructures importantes pour l'exploitation minière ou le transport des combustibles (comme les gazoducs), ces hypothèses surestiment probablement l'Empreinte carbone de N3 et les terrains bâtis nécessaires pour accueillir les infrastructures des unités de combustion de biomasse. L'intensité d'EE de l'énergie issue des déchets industriels et municipaux pourrait alors être encore plus avantageuse.

Puis l'analyse omet également la surface occupée par les infrastructures d'une centrale hydraulique autre que la surface inondée par le réservoir. La surface de ces infrastructures est probablement très réduite comparée à la surface de la zone inondée et n'influence par conséquent pas fortement les résultats.

L'importance de la surface des terrains bâtis pour les énergies renouvelables pousse à une analyse plus approfondie de ce composant. Selon la méthode des CNE, les terrains bâtis sont considérés comme des anciennes terres cultivées, actuellement occupées par des infrastructures. Par conséquent, le FR et le FEQ des terres cultivées sont appliqués. Etant donnée que l'agriculture belge connaît des rendements importants par rapport aux rendements mondiaux, le FR est important pour la Belgique : 2,89 ha_m/ha. Il faut donc 2,89 ha au rendement moyen mondial pour avoir la même production qu'un ha belge. Le FEQ est également élevé, exprimant le rendement important des terres cultivées par rapport aux autres types de sol: 2,51 ha_g/ha_m. Pour la Belgique, les hectares réels occupés par des infrastructures sont alors multipliés par 7,25 ha_g/ha (2,89 ha_m / ha * 2,51 ha_g/ha_m). Pourtant, en réalité, les infrastructures des énergies renouvelables ne se retrouvent pas nécessairement en compétition avec des terres cultivées. L'installation des panneaux PV sur le toit des bâtiments existants ou dans des régions arides réduit fortement l'impact au niveau de la surface nécessaire aux infrastructures. L'impact de la surface occupée par les infrastructures des installations éoliennes est également limité, vu que les sites les plus attractifs se trouvent souvent dans des régions éloignées ou offshore. En plus, la surface réellement occupée par les turbines et les autres infrastructures ne représente que 5% du terrain, le restant étant disponible pour le pâturage, la pêche ou d'autres utilisations (Wackernagel & Monfreda 2004, pp.7-8). Pour permettre une comparaison valide, il serait donc nécessaire de déterminer le type de sol réel de l'emplacement des infrastructures et d'appliquer le FR et le FEQ appropriés. Pour les panneaux solaires PV installés sur des toits, l'EE des terrains bâtis pourrait alors même être égale à 0, réduisant énormément l'EE de l'énergie solaire PV. Afin de visualiser l'effet de cette hypothèse sur l'intensité d'EE de l'électricité issue de l'énergie solaire PV, j'ai recalculé l'intensité d'EE en supposant que l'EE des terrains bâtis est égale à 0. Pour l'électricité issue de l'énergie éolienne, j'ai recalculé l'intensité d'EE en supposant que les terrains bâtis ne concernent que 5% du terrain et que le restant du terrain est utilisé pour le pâturage. Au lieu du FEQ pour les terres cultivées, j'ai appliqué le FEQ pour les pâturages. L'apport de l'Empreinte des terrains bâtis à l'intensité d'EE totale devient alors négligeable et l'intensité d'EE est réduite de la moitié (voir Tableau 18 et Graphique 9).

Pour les centrales hydroélectriques, la zone inondée est supposée être une zone de terre moyenne mondiale

(FEQ = 1). Elle est calculée à partir de la production d'électricité, en appliquant un facteur de conversion moyen mondial. Néanmoins, en Belgique, une importante partie de la capacité installée concerne des centrales hydroélectriques au fil de l'eau, situées sur des barrages et des écluses existantes visant à améliorer la navigabilité des cours d'eau. Ce genre de centrales implique par conséquent peu ou pas de surfaces inondées supplémentaires. Pour les autres centrales, le réservoir d'eau peut être valorisé à des fins récréatives et sportives et en vue de la maîtrise des crues (CWaPE 2010b, p.40; IBGE 2009, p.4; GEO z.d.). Afin d'estimer l'effet de ces constats sur l'intensité d'EE de l'électricité issue de l'énergie hydraulique, j'ai recalculé l'intensité d'EE en divisant la surface inondée par 4. Ce facteur 4 traduit l'hypothèse que la moitié de la capacité installée concerne des centrales au fil de l'eau construites sur des barrages et des écluses existantes et que la moitié du réservoir est attribuée aux activités de gestion de l'eau et de récréation. L'apport de la surface inondée à l'intensité d'EE totale devient alors considérablement plus réduit et l'intensité diminue de deux tiers. L'hydroélectricité devient alors plus avantageuse en termes d'intensité d'EE que l'électricité nucléaire (voir Tableau 18 et Graphique 9).

En ce qui concerne la biomasse, il est important de remarquer que je me suis basée sur les coefficients d'émission déterminés par la CWaPE. Les facteurs d'émission utilisés par le GIEC et dans les tableaux standardisés pour l'inventaire national annuel des GES dans le cadre du protocole de Kyoto (Greenhouse Gas Inventory GGI) diffèrent considérablement de ceux de la CWaPE, en particulier en ce qui concerne les déchets industriels et la biomasse (voir Tableau 56 en annexe 3). Par conséquent, l'EE d'un TWh_e sur base de déchets industriels ou de bois-énergie serait beaucoup plus élevée si je m'étais basée sur les facteurs d'émission du GIEC. Afin d'estimer l'importance de la différence, j'ai recalculé l'intensité d'EE selon le facteur d'émission du GIEC. L'impact est énorme : l'intensité d'EE de l'électricité issue des déchets passe de la valeur la plus favorable à la valeur la plus défavorable, dépassant d'un facteur 1,5 l'intensité d'EE de l'électricité issue de charbon. L'intensité d'EE de biomasse en générale (le GIEC ne détermine pas de facteur pour le bois-énergie) est également très élevée (voir Tableau 18 et Graphique 9) (CWaPE 2010a, p.6; GIEC 2006, p.2.16; Flemish Environment Agency et al. 2011).

Ensuite, il convient de rappeler que l'EE est favorable à l'énergie nucléaire, parce qu'elle n'inclut pas l'émission des pollutions radioactives, ainsi que la notion du risque. Afin de donner une idée de l'impact d'un accident nucléaire sur l'intensité d'EE de l'électricité issue de l'énergie nucléaire, j'ai recalculé l'intensité d'EE pour un scénario d'accident majeur. La zone d'exclusion due à l'accident de Tchernobyl est de 170.000 ha, mais des centaines de milliers d'hectares supplémentaires ne sont accessibles que pour des activités restreintes, possiblement encore pour des milliers d'années à venir (Wackernagel & Monfreda 2004, p.6). La zone d'exclusion de laquelle la population a été évacuée après l'accident de Fukushima concernait un rayon de 30 km. Néanmoins, après une analyse de l'irradiation radioactive et de l'incidence des cancers supplémentaires prévue, des chercheurs conseillent d'élargir cette zone à un rayon de 100 km (Busby 2010,

p.12). Ainsi il s'agirait d'une surface de 282.600 à 3.140.000 ha⁸⁰. J'utiliserai comme estimation un scénario avec une zone d'exclusion de 300.000 ha (rayon d'environ 30 km) et un scénario avec une zone d'exclusion de 3.000.000 ha (rayon d'environ 100 km). Je supposerai qu'il s'agisse des terres à rendement moyen mondial (FR et FEQ = 1). Afin de déterminer l'impact par unité de production d'un TWh_e annuel, je supposerai qu'un accident nucléaire se produise environ tous les 25 ans. La production annuelle mondiale d'électricité était d'environ 18,6*10³ TWh en 2008 (IEA 2010, p.48). Même en cas d'accident majeur, l'impact de la production d'électricité sur base d'énergie nucléaire reste plus faible que celui de la production sur base du solaire PV, du gaz naturel et du charbon (voir Tableau 18 et Graphique 9). Néanmoins, l'estimation de cet impact est très rudimentaire. D'un côté, elle ne tient que compte de la zone d'exclusion, tandis qu'une surface beaucoup plus large est atteinte. De l'autre côté, les conséquences d'un accident se font sentir pendant très longtemps et sont donc en quelque sorte cumulatives. De plus, en supposant qu'il ne s'agisse pas de terres à rendement moyen mondial, mais de terres cultivées ou de terrains bâtis, l'impact de la zone d'exclusion serait 7 fois plus grand (voir Tableau 18 et Graphique 9). Finalement, l'impact d'un accident ne se reflète pas seulement en termes de pertes de terres bioproductives, mais également en termes de souffrance humaine. Ceci implique donc des considérations éthiques, qui ne sont évidemment pas représentées par l'EE.

Finalement, il est important de mentionner que la consommation d'électricité est variable et qu'il faut donc tenir compte de la gestion de la production pour permettre de répondre aux besoins. La production d'électricité sur base du gaz naturel, du charbon et de la biomasse, peut se faire en fonction des besoins en électricité. Les centrales TGV sur base du gaz naturel présentent la plus grande flexibilité. La production peut être adaptée selon les besoins, sans qu'il y ait une perte de rendement. Pour les centrales au charbon et à la biomasse (solide), les centrales hydroélectriques et les centrales nucléaires, un changement du régime de fonctionnement implique une diminution du rendement. Afin de combler cette diminution, il faudrait une production d'électricité supplémentaire de 0 à 25%. Les énergies solaires et éoliennes sont des énergies de flux, qui présentent une grande variabilité et ne permettent pas de gestion de la production. Elles nécessitent par conséquent des capacités de stockage beaucoup plus importantes, nécessitant une production d'électricité supplémentaire d'environ 20 à 50%⁸¹. Graphique 10 montre l'impact de ces besoins de stockage sur l'intensité d'EE de l'électricité issue de différentes énergies primaires, calculé sur base d'un besoin supplémentaire de production d'électricité de 50% pour la production éolienne et solaire PV et de 25% pour la production sur base de charbon, d'énergie hydraulique et nucléaire. Malgré les besoins de stockage, la production d'électricité issue des ER reste beaucoup plus avantageuse que celle issue du gaz naturel et du charbon en termes d'intensité d'EE. Seul la production d'électricité issue de l'énergie solaire PV est moins avantageuse que celle sur base du gaz naturel, sauf sous l'hypothèse que les panneaux PV sont installés sur le toit des bâtiments existants. Vu les hauts niveaux d'incertitude concernant les émissions de CO₂ liées à la combustion

80 $\Pi \cdot (30 \text{ km})^2 = 2.826 \text{ km}^2 = 282.600 \text{ ha}$ et $\Pi \cdot (100 \text{ km})^2 = 31.400 \text{ km}^2 = 3.140.000 \text{ ha}$

81 Chiffres obtenus suite à une conversation téléphonique avec Ir. Michel Huart le 02.08.2011

de la biomasse, cette énergie n'est plus reprise dans le graphique.

Tableau 18: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité sur base d'hypothèses alternatives
(en ha_g/TWh_e*an)

Energie	Empreinte carbone N1+N2 (10 ³ ha _g) (%)	Empreinte carbone N3 (10 ³ ha _g) (%)	Terrains bâtis (10 ³ ha _g) (%)	Forêts (10 ³ ha _g) (%)	EE totale (10 ³ ha _g)
Fossile					
Gaz Naturel	127 (92%)	8 (6%)	4 (3%)	-	139
Charbon	277 (95%)	12 (4%)	4 (1%)	-	293
Nucléaire					
Sans accident	11 (58%)	7 (40%)	0,4 (2%)	-	18
Accident-rayon 30km	11 (58%)	7 (37%)	1 ^{82*} (3%)	-	19
Accident-rayon 100km	11 (44%)	7 (28%)	7 ^{83*} (28%)	-	25
Accident-rayon 100km terres cult. – terr. bâtis	11 (16%)	7 (10%)	51 ^{84***} (74%)	-	69
Hydraulique					
Conventionnel	0 (0%)	2 (11%)	13 ^{***} (89%)	-	15
Au fil de l'eau et valorisation	0 (0%)	2 (40%)	3 ^{***} (60%)	-	5
Eolienne					
Conventionnel	0 (0%)	5 (49%)	5 (51%)	-	9
Valorisation pâturage	0 (0%)	5 (99%)	0,05 ⁸⁵ (1%)	-	5
Solaire photovoltaïque					
Au sol	0 (0%)	46 (43%)	60 (57%)	-	106
Sur les toits	0 (0%)	46 (100%)	0 (0%)	-	46
Biomasse					
Déchets industriels et municipaux	0 (0%)	11 (75%)	3 (25%)	-	14
Déchets industriels (GIEC)	466 ⁸⁶ 97%)	11 (2%)	3 (1%)	-	480
Bois-énergie	27 (12%)	11 (5%)	3 (2%)	190 (82%)	231
Biomasse (GIEC)	244 ⁸⁷ (54%)	11 (3%)	3 (1%)	190 (42%)	448

* Zone d'exclusion (FR = FEQ = 1), ** Zone d'exclusion (FEQ = 2,51 et FR = 2,89), *** Surface inondée (FR = FEQ = 1)

Source : Tableau 4, Tableau 6, Tableau 8, Tableau 10, Tableau 12, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16

82 $300 \cdot 10^3 \text{ ha}_g \cdot (25 \text{ ans} \cdot 18,6 \cdot 10^3 \text{ Twh})^{-1} = 0,645 \text{ ha}_g(\text{TWh}_e \cdot \text{an})$

83 $3.000 \cdot 10^3 \text{ ha}_g \cdot (25 \text{ ans} \cdot 18,6 \cdot 10^3 \text{ Twh})^{-1} = 6,45 \text{ ha}_g(\text{TWh}_e \cdot \text{an})$

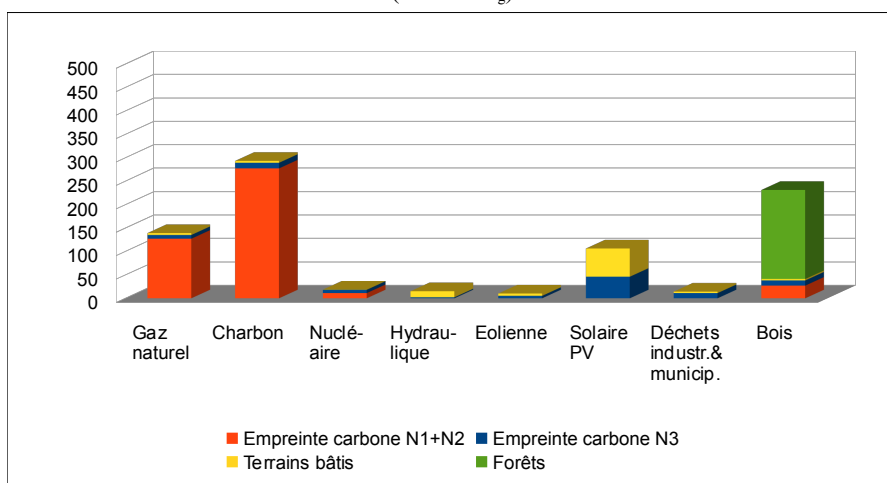
84 $3.000 \cdot 10^3 \text{ ha}_g \cdot (25 \text{ ans} \cdot 18,6 \cdot 10^3 \text{ Twh})^{-1} = 6,45 \text{ ha}_g(\text{TWh}_e \cdot \text{an})$

85 $2 \cdot 10^3 \text{ ha}_m \cdot 0,05 \cdot 0,46 \text{ ha}_g/\text{ha}_m = 0,05 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

86 En supposant un rendement de 30%, il faut 3,33 TWh_p pour produire un TWh_e. Les émissions de CO₂ liées à cette production sont alors égales à $3,33 \cdot 511 \text{ ktCO}_2/\text{TWh} = 1.702 \text{ ktCO}_2$. L'EE_e est égale à $[(1.702.000 \text{ tCO}_2 \cdot (1-0,22))/3,59 \text{ ha}_m/\text{tCO}_2] \cdot 1,26 \text{ ha}_g/\text{ha}_m = 465.940 \text{ ha}_g$

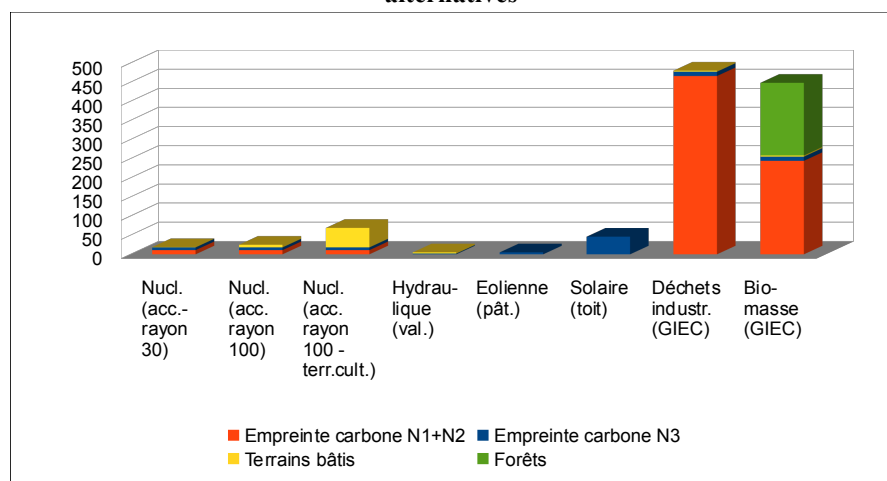
87 En supposant un rendement de 40%, il faut 2,5 TWh_p pour produire un TWh_e. Les émissions de CO₂ liées à cette production sont alors égales à $2,5 \cdot 357 \text{ ktCO}_2/\text{TWh} = 893 \text{ tCO}_2$. L'EE_e est alors égale à $[(893.000 \text{ tCO}_2 \cdot (1-0,22))/3,59 \text{ ha}_m/\text{tCO}_2] \cdot 1,26 \text{ ha}_g/\text{ha}_m = 244.468 \text{ ha}_g$

Graphique 8: Comparaison de l'intensité d'EE de l'électricité issue des différentes énergies primaires
(en 10³ ha_g)



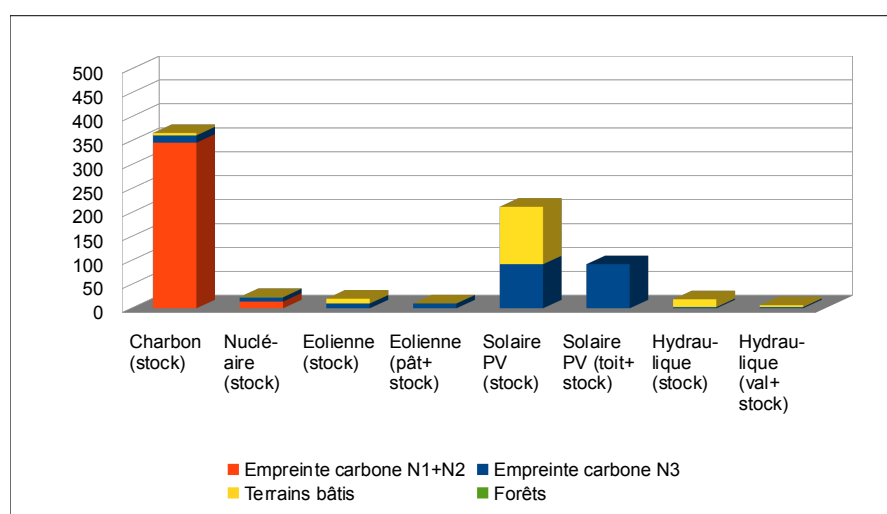
Source : Tableau 17

Graphique 9: Comparaison de l'intensité d'EE sur base d'hypothèses alternatives



Source : Tableau 18

Graphique 10: Comparaison de l'intensité d'EE en tenant compte du stockage



Source : Tableau 18

Tableau 19 synthétise, de façon simplifiée, les constats les plus importants. Seulement trois modes de production d'électricité ont une intensité d'EE plus basse que celle sur base du gaz naturel : la production à partir de l'énergie hydraulique, éolienne et nucléaire. L'énergie hydraulique et l'énergie éolienne ont l'intensité d'EE la plus basse, même en tenant compte des besoins de production supplémentaire afin de garantir le stockage requis. Sous l'hypothèse d'une valorisation du réservoir d'eau ou du terrain sur lequel les éoliennes sont installées, l'intensité d'EE est très réduite. Selon cette hypothèse, l'hydroélectricité est plus avantageuse en termes d'EE que la production éolienne. La production d'électricité issue d'énergie nucléaire reste une production à basse intensité d'EE, même en tenant compte des accidents. Il convient de rappeler que l'estimation est pourtant très rudimentaire et qu'il y a d'autres conséquences qui doivent être considérées. La production d'électricité solaire PV pourrait être plus avantageuse que la production issue du gaz naturel à condition que les panneaux PV soient installés sur les toits des bâtiments existants. Sinon la production sur base du gaz naturel connaîtrait une intensité d'EE plus basse. Le bilan de la production d'électricité issue de la biomasse est très mitigé. Pour les déchets industriels, l'intensité d'EE varie de $20 \cdot 10^3$ à $625 \cdot 10^3$ ha_g, selon les coefficients d'émission de CO₂ choisis. Probablement, la CWaPE adopte un facteur d'émission de 0 suivant l'hypothèse que ces déchets devaient de toute façon être incinérés, qu'il y ait ou pas une valorisation énergétique. Par conséquent, cette production n'impliquerait pas d'émissions de CO₂ supplémentaires. Selon cette hypothèse, l'électricité sur base des déchets industriels et municipaux a une intensité d'EE comparable à celle de la production hydraulique ou éolienne. En se basant sur les coefficients du GIEC, elle dépasse néanmoins largement celle du charbon. La variation de l'intensité d'EE de la biomasse et du bois-énergie est également très grande, mais l'intensité d'EE est de toute façon plus grande que celle de la production issue du solaire PV. La production sur base du charbon connaît une intensité d'EE assez élevée. Elle est plus importante que celle de la biomasse selon la CWaPE, mais plus faible que celle de la biomasse selon le GIEC.

Tableau 19: Classement de l'électricité issue de différents énergies primaire selon l'intensité d'EE

Energie primaire	Intensité d'EE (10 ³ ha _g)	Intensité d'EE hypothèses alternatives (10 ³ ha _g)	Intensité d'EE stockage (10 ³ ha _g)
Hydraulique	15	5	20 - 6
Eolienne	10	5	20 - 10
Nucléaire	20	70	25 - 90
Gaz naturel	150	-	-
Solaire PV	100	50	200 - 100
Déchets industriels et municipaux	15	500	20 - 625
Biomasse	200	450	250 - 550
Charbon	300	-	375

Source : Tableau 17, Tableau 18 et Graphique 8

Chapitre 3 : analyse de l'Empreinte écologique selon différents scénarios de production d'électricité

Dans ce chapitre, j'analyserai l'impact de différents scénarios de production d'électricité sur l'EE belge. La première section décrit l'impact de différents bouquets électriques sur l'EE et l'Empreinte carbone (EE_c) belge. Il s'agit d'un scénario de production d'électricité à 100% sur base des énergies fossiles (Scénario fossile), à 100% sur base d'énergie nucléaire (Scénario nucléaire), à 100% issue de biomasse (Scénario biomasse) et à 100% sur base d'ER (Scénario ER). L'impact des différents scénarios est à chaque fois comparé à un scénario de référence, la production d'électricité réelle en Belgique en 2007. Puis l'EE et l'EE_c pour différents scénarios d'URE électrique sont étudiées. Il s'agit d'un scénario de stabilisation (diminution de 7% de la consommation) et un scénario de réduction (diminution de 24% de la consommation) électrique. Je supposerai que la production diminue de façon équivalente. Pour chaque scénario, je testerai un scénario qui suppose une réduction proportionnelle pour chaque énergie primaire et un scénario qui favorise les ER. L'impact des différents scénarios est à nouveau comparé au scénario de référence. Finalement, les EE des différents scénarios sont comparées et discutées. Le chapitre est clôturé par une analyse critique du comportement de l'EE face aux scénarios de production d'électricité. Le lecteur souhaitant plus d'information sur les facteurs constants utilisés dans les CNE peut se référer à l'annexe 2. Davantage d'informations sur les données sur lesquelles les calculs sont fondés et la façon dont les calculs ont été effectués, figurent en annexe 4.

Comme mentionné précédemment, l'EE ne permet pas de modélisations ou de prévisions sur le futur. Il est seulement possible de tester des scénarios « *et si...* » (voir Les principales critiques , p. 35). Afin de tester un scénario pour l'année 2030, il faudrait alors mettre en oeuvre d'autres outils pour faire des projections sur la croissance économique et démographique, l'évolution de la consommation et des prix de l'énergie... Néanmoins l'objectif principal de ce chapitre est de comparer l'impact de différents scénarios de production d'électricité et d'analyser le comportement de l'EE face à ces scénarios. Par conséquent, il est surtout important que les conditions dans lesquelles les scénarios sont testés, restent identiques. Je me limiterai alors à tester des scénarios pour l'année 2007, comme par exemple « *si en 2007, on aurait fait en sorte de produire 100% de notre électricité sur base d'énergies renouvelables, quelle serait alors notre EE ?* ». Ainsi j'évite de faire des projections supplémentaires, qui impliqueraient davantage d'incertitudes et d'hypothèses, sans vraiment avoir une valeur ajoutée.

Afin de mettre en perspective les résultats présentés dans ce chapitre, il est utile de mentionner que le secteur de la production d'électricité était responsable d'environ 18% des émissions de CO₂ totales liées à la production belge en 2007 (CNE, édition 2010). La consommation d'électricité représentait alors 20% de la

consommation d'énergie finale en Belgique (Eurostat 2010, p.25). Ce taux pourrait néanmoins augmenter dans le futur, suite à une électrification croissante de notre consommation énergétique.

Pour les analyses, je me baserai sur le fichier excel des CNE, édition 2010, qui porte sur la Belgique pour l'année 2007. Les CNE utilisent la méthode par agrégation et se basent donc sur des données statistiques agrégées. Afin de tester des scénarios fictifs, il est impossible de se baser sur des statistiques existantes. J'utiliserai donc la méthode par composants pour calculer les variations induites par les scénarios fictifs par rapport aux valeurs réelles en 2007.

Pour chaque scénario je suivrai les démarches suivantes :

1. Détermination de la production nécessaire pour répondre à la demande annuelle en électricité et comparaison à la production d'électricité actuelle par énergie primaire concernée.
2. Détermination de la capacité pour la production d'électricité nécessaire pour répondre à la demande en électricité annuelle par énergie primaire concernée et comparaison à la capacité actuellement installée.
3. Calcul des émissions de CO₂ liées à l'énergie incorporée dans les matériaux et l'énergie directe nécessaire à la construction de la capacité supplémentaire nécessaire (N3).
4. Calcul de la surface nécessaire aux infrastructures pour la production d'électricité concernée afin de construire la capacité supplémentaire nécessaire.
5. Détermination de l'énergie primaire concernée nécessaire à la production supplémentaire nécessaire et les émissions de CO₂ éventuelles liées à l'extraction, le traitement, le transport, la combustion et l'élimination de cette énergie primaire.
6. Pour la biomasse : détermination de la quantité de biomasse nécessaire à la production supplémentaire afin de calculer la surface de forêt ou de terres cultivées nécessaires à sa production.

Je partirai de l'hypothèse que toute la capacité supplémentaire est installée en Belgique et que toutes les matériaux sont également produites en Belgique. Pour des raisons de simplicité, je supposerai que de nouvelles infrastructures soient installées sur des terrains vides, et ne remplacent par conséquent pas d'infrastructures existantes. Les matériaux nécessaires sont des matériaux nouveaux. Ceci constitue une sur-estimation pour certaines technologies, tant en surface qu'en matière, vu que des centrales nucléaires pourraient par exemple être construites aux endroits où se trouvent actuellement des centrales thermiques. Une partie des matériaux pourrait probablement également être recyclée. Néanmoins, en ce qui concerne la conversion des centrales thermiques conventionnelles au charbon vers des centrales au gaz naturel ou à la biomasse ou vice versa, je partirai de l'hypothèse que cette conversion pourrait se faire avec un investissement énergétique et matériel négligeable.

Pour calculer l'énergie grise contenue dans les matériaux, j'utiliserai les facteurs d'intensité énergétiques utilisées dans les CNE pour les calculs des importations et des exportations. En effet, dans les CNE, l'Empreinte carbone de la production Belge est directement calculée à partir des émissions de CO₂ déclarées

par secteur à l'IEA. La classification par secteur ne comprend que 38 catégories et ne permet donc pas de calculer des facteurs d'intensité énergétique détaillés pour la production belge. A titre de comparaison : les facteurs d'intensité énergétique utilisés dans les calculs des exportations et des importations sont repartis en 625 catégories et ne permettent déjà pas une classification des matériaux très précise.

Je suppose ici qu'une augmentation en capacité entraîne une augmentation équivalente en matériaux et en énergie grise nécessaire à la construction des infrastructures. Cette hypothèse de relation linéaire entraîne probablement une surestimation des matériaux et de l'énergie nécessaire à la construction, vu les économies d'échelle.

1 L'impact de différents bouquets électriques sur l'Empreinte écologique belge

L'Empreinte écologique pour la production d'électricité réelle en Belgique en 2007

Tableau 20 résume la production d'électricité et la capacité installée par vecteur énergétique en Belgique en 2007. Pour calculer les émissions de CO₂, les CNE utilisent des données de l'IEA et se basent sur un chiffre de 22,6 MtCO₂ par an. Néanmoins, il n'y a pas de détails disponibles sur la répartition de ces émissions selon les différentes énergies primaires. Il est par conséquent difficile de comparer des scénarios s'il n'y a pas de certitude sur quel facteur d'émission de CO₂ et sur quelles quantités d'énergie primaire le scénario de référence (la situation énergétique réelle en 2007) est basé. L'énergie nucléaire n'est pas non plus comprise dans les calculs des CNE. Je me suis alors basée sur les calculs de N1 + N2 que j'ai élaborés dans le chapitre précédent pour recalculer les émissions de CO₂ (voir Tableau 21). Le total obtenu équivaut 22 MtCO₂ par an, un chiffre qui est proche des données des CNE.

Il convient de rappeler ici que la consommation d'électricité finale était de 83 TWh en 2007. La différence entre la consommation finale et la production brute est due aux exportations, aux pertes et à la consommation d'énergie du secteur de l'énergie même. Les exportations nettes d'électricité en 2007 étaient de 7 TWh (Eurostat 2010, p.26).

Tableau 20: Production d'électricité et capacité installée par vecteur énergétique en Belgique en 2007

Technologie de production	Production d'électricité brute (TWh _e /an)	Capacité installée (GW)	Emissions de CO ₂ (N1+N2) (MtCO ₂ /an)
Centrales thermiques conventionnels	38	9	20,4
Charbon	6	-	7 ⁸⁸
Gaz naturel	25	-	12 ⁸⁹
Produits pétroliers	0,8	-	0,2 ⁹⁰
Gaz dérivés	2	-	0,9 ⁹¹
Biomasse	3	-	0,3 ⁹²
Déchets industriels	0,8	-	0
Centrales nucléaires	48	6	2⁹³
Installations éoliennes	0,5	0,3	0
Centrales hydroélectriques	2	1	0
Installations solaires PV	0,006	0,02	0
Total	89	16	22

Source : Eurostat 2010, pp.26-27 et pp.34-35 et Tableau 21 (colonne 3 : calculs propres).

Pour le calcul des autres impacts liés à notre production d'électricité, je me baserai également sur les calculs élaborés dans le chapitre précédent. Ainsi un niveau de détail permettant une analyse plus approfondie, est assuré et les résultats seront également plus cohérents avec les calculs qui ont déjà été effectués. Tableau 21 résume les résultats les plus importants en vue des calculs présentés dans ce chapitre.

Tableau 21: Capacités et impacts par vecteur énergétique

Vecteur énergétique	Capacité nécessaire à produire 1 TWh _e par an (MW)	N1 + N2 par TWh d'électricité produite (ktCO ₂ / TWh _e)	N3 par MW de capacité installée (tCO ₂ / MW)	Surface par MW de capacité installée (ha / MW)
Gaz naturel	158	464	49 ⁹⁴	3,2
Charbon	164	1.013	71 ⁹⁵	3,2
Nucléaire	132	39	54 ⁹⁶	0,4
Hydraulique	256	0	6 ⁹⁷	-
Eolienne	484	0	9 ⁹⁸	1,7 ⁹⁹
Solaire PV	833	0	55 ¹⁰⁰	10
Biomasse	150	0 - 100	71 ¹⁰¹	3,2

Source : Tableau 4, Tableau 6, Tableau 8, Tableau 10, Tableau 12, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16

- 88 $1.012.550,00 \text{ tCO}_2 / \text{TWh} * 6,473 \text{ TWh} = 6.554.236 \text{ tCO}_2 = 6,55 \text{ MtCO}_2$
89 $464.350,00 \text{ tCO}_2 / \text{TWh} * 25,384 \text{ TWh} = 11.787.060 \text{ tCO}_2 = 11,79 \text{ MtCO}_2$
90 $76,68 \text{ tCO}_2 / \text{TJ} * 813 \text{ GWh} * 3,6 \text{ TJ} / \text{GWh} = 224.427 \text{ tCO}_2 = 0,22 \text{ MtCO}_2$
91 $464.350,00 \text{ tCO}_2 / \text{TWh} * 1,854 \text{ TWh} = 860.904 \text{ tCO}_2 = 0,86 \text{ MtCO}_2$
92 $100.000,00 \text{ tCO}_2 / \text{TWh} * 3,107 \text{ TWh} = 310.700 \text{ tCO}_2 = 0,31 \text{ MtCO}_2$
93 $38.520 \text{ tCO}_2 / \text{TWh} * 48,277 \text{ TWh} = 1.857.704,04 \text{ tCO}_2 = 1,86 \text{ MtCO}_2$
94 $7.797,96 \text{ tCO}_2 / 157,73 \text{ MW}$
95 $11.637,29 \text{ tCO}_2 / 164,47 \text{ MW}$
96 $7.169,08 \text{ tCO}_2 / 131,58 \text{ MW}$
97 $1.568,77 \text{ tCO}_2 / 256,41 \text{ MW}$
98 $4.562,77 \text{ tCO}_2 / 484,32 \text{ MW}$
99 $3,91 \text{ ha}_m / 2,28 \text{ ha}_m(\text{ha})^{-1} = 1,71 \text{ ha}$
100 $45.778,31 \text{ tCO}_2 / 833,33 \text{ MW}$
101 $10.613,45 \text{ tCO}_2 / 150 \text{ MW}$

Tableau 22 montre l'EE de la Belgique pour l'année 2007, basée sur la production d'électricité réelle en 2007 et recalculée selon les données présentées en Tableau 20. L'EE totale valait $86,5 \cdot 10^6$ ha_g. L'Empreinte carbone équivalait la moitié de l'Empreinte totale. L'Empreinte des terres cultivées avait également un apport important : environ un quart de l'Empreinte totale.

Tableau 22: EE pour la situation énergétique réelle en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	43,1
Terres cultivées	22,6
Pâturages	7,3
Surfaces de pêche	2,5
Forêts	6,4
Terrains bâtis	4,7
Total	86,5

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 20

Tableau 23 montre le détail pour l'Empreinte carbone (EE_c). L'EE_c est calculée selon la formule suivante :

$$EE_c = EE_{cp} + EE_{ccomb.soute} + EE_{ci} - EE_{ce} + \text{électricité échangée}$$

Où EE_{cp}, EE_{ccomb.soute}, EE_{ci} et EE_{ce} sont l'Empreinte carbone de la production, des combustibles de soute, des importations et des exportations respectivement. L'Empreinte carbone de la production des émissions de combustibles est l'Empreinte des émissions de CO₂ causées par la production des différents secteurs en Belgique : le secteur de l'énergie, le secteur de fabrication et de construction, le secteur du transport et les autres secteurs (agriculture, secteur commerciale et publique...). L'Empreinte carbone des exportations et des importations des émissions de combustibles, concerne l'Empreinte carbone de l'énergie grise incorporée dans tous les produits échangés par le commerce international. Il est important de remarquer que, dans les CNE, l'intensité carbone des produits exportés est déterminée à partir d'un facteur constant, l'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale. L'intensité carbone des produits exportés, par contre, est un facteur variable, calculé selon la formule suivante :

$$\frac{(\text{Emissions de CO}_2 \text{ liées à la production belge} + \text{incorporées dans les importations})}{(\text{TPES (total primary energy supply) domestique} + \text{énergie incorporée dans les importations})}$$

Le même raisonnement s'applique à l'intensité carbone de l'électricité. L'intensité carbone de l'électricité importée est un facteur constant, l'intensité carbone de l'électricité régionale, tandis que l'intensité carbone de l'électricité exportée est calculée selon la formule suivante :

$$\frac{(\text{Emissions de CO}_2 \text{ liées à la production d'électricité belge} + \text{incorporées dans l'électricité importée})}{(\text{quantité d'électricité produite} + \text{quantité d'électricité importée})}$$

L'intensité carbone des produits exportés est égale à $5 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ et l'intensité carbone de l'électricité exporté à 0,3 ktCO₂/GWh pour le scénario de référence.

Une baisse de l'intensité carbone de l'électricité produite en Belgique, entraîne alors à la fois une diminution de l'Empreinte des émissions de la production et une diminution de l'Empreinte carbone exportée (en termes d'émissions de combustibles et en termes d'électricité échangée dans le commerce international). Ainsi l'Empreinte de consommation du commerce international en électricité augmente, vu que l'Empreinte des importations reste inchangée et l'Empreinte des exportations diminue. L'Empreinte de consommation des émissions de combustibles diminue un peu, mais pas à la même hauteur que la diminution de l'Empreinte de production. Ainsi la diminution d'Empreinte de production des émissions est partiellement annulée. Vu l'importance des exportations et des importations par rapport à la production belge, ce mécanisme a une influence assez importante sur les résultats (voir aussi Faiblesses des CNE spécifiques pour la Belgique, p. 47).

Tableau 23: EE_c pour la situation énergétique réelle en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	28,8	82,5	77,5	33,8
Commerce international en électricité	-	2,6	0,7	1,9
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	36,1	85,1	78,1	43,1

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 20

L'impact du scénario fossile sur l'Empreinte écologique belge

Le scénario fossile implique que 100% de l'électricité est produite à partir des énergies fossiles. Je supposerai que 75% de l'électricité soit généré à partir de gaz naturel et 25% à partir de charbon¹⁰². Ainsi, 67 TWh_e serait produit à partir de gaz naturel et 22 TWh_e à partir du charbon.

Tableau 24 montre le résultat des calculs. L'EE du scénario fossile est plus importante que celle du scénario de référence : $+ 2,0 \cdot 10^6$ ha_g. La différence est surtout due à l'augmentation de l'Empreinte carbone.

¹⁰²Pour les énergies fossiles, le gaz naturel était la source la plus importante en 2007, suivi par le charbon et les produits pétroliers (respectivement 74%, 23% et 3%) (Eurostat 2010, p.27).

Tableau 24: EE pour le scénario fossile en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario fossile (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	44,9	43,1	+ 1,9
Terres cultivées	22,6	22,6	0
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	0
Terrains bâtis	4,8	4,7	+ 0,1
Total	88,5	86,5	+ 2,0

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 58

L'intensité carbone des produits exportés est égale à $6 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ pour le scénario fossile, une augmentation de presque 17%. L'intensité carbone de l'électricité exportée est égale à $6 \cdot 10^{-4}$ MtCO₂/GWh, le double de celle du scénario de référence. Tableau 25 démontre effectivement que l'augmentation originale de l'Empreinte de production des émissions de combustibles est encore plus importante, mais qu'elle est affaiblie par l'augmentation de l'Empreinte carbone des exportations. Bien que l'Empreinte carbone de production des émissions de combustibles augmente de 29%, l'Empreinte carbone de consommation totale, n'augmente que de 4,2%. L'Empreinte carbone des exportations n'augmente que de 8,5% non plus, mais vu l'importance de l'Empreinte des exportations des émissions de combustibles par rapport à l'Empreinte de la production des émissions de combustibles, l'impact de cette diminution est très important.

Tableau 25: EE_c pour le scénario fossile en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	37,5	82,5	83,5	36,5
Commerce international en électricité	-	2,6	1,4	1,1
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	44,8	85,1	85,0	44,9

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 58

L'impact du scénario nucléaire sur l'Empreinte écologique belge

Le scénario nucléaire suppose que 100% de l'électricité soit générée à partir de l'énergie nucléaire. Tableau 26 montre le résultat des calculs. L'EE du scénario nucléaire est plus faible que celle du scénario de référence : $-1,1 \cdot 10^6$ ha_g. La différence est surtout due à la diminution de l'Empreinte carbone. La surface des terrains bâtis augmente selon l'hypothèse que de nouvelles centrales nucléaires seraient construites sur des terrains vides (et non en remplaçant des centrales thermiques existantes).

Tableau 26: EE pour le scénario nucléaire en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario nucléaire (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	41,9	43,1	- 1,2
Terres cultivées	22,6	22,6	0
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	0
Terrains bâtis	4,7	4,7	+ 0,02
Total	85,4	86,5	- 1,1

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 60

L'intensité carbone des produits exportés est égale à $5 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ pour le scénario nucléaire. L'intensité carbone de l'électricité exportée diminue à $1 \cdot 10^{-4}$ MtCO₂/GWh, trois fois plus faible que celle du scénario de référence. Tableau 27 démontre effectivement que la diminution originale de l'Empreinte de production des émissions de combustibles est encore plus importante, mais qu'elle est affaiblie par la diminution de l'Empreinte carbone des exportations.

Tableau 27: EE_c pour le scénario nucléaire en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	23,9	82,5	74,0	32,3
Commerce international en électricité	-	2,6	0,3	2,3
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	31,2	85,1	74,4	41,9

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 60

L'impact du scénario biomasse sur l'Empreinte écologique belge

Ce scénario suppose une production d'électricité à 100% issue de biomasse. Je me baserai sur les projections du National Renewable Energy Action Plan (NREAP) pour 2020 pour déterminer la quantité maximale de biomasse disponible en Belgique et je supposerai que le restant de la biomasse soit importé (CONCERE 2010). Pour des raisons de simplicité, je supposerai que les importations en biomasse de bois concernent des granulés de bois. Vu qu'il ne s'agit pas de bois cultivé uniquement pour une valorisation énergétique, je supposerai que sa production ne nécessite pas de surface de forêt supplémentaire. Pour les 3% de cultures agricoles et produits de pêche, je part de l'hypothèse qu'il s'agit de cultures énergétiques de maïs et pour les 6% de sous-produits et résidus agricoles qu'il s'agit d'herbes pour l'ensilage.

Tableau 28 résume les résultats. L'EE pour le scénario biomasse est de $3,1 \cdot 10^6$ ha_g plus grande que celle du scénario de référence, bien que l'Empreinte carbone diminue. La différence est largement due à l'importance de l'Empreinte des terres cultivées.

Tableau 28: EE pour le scénario biomasse en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario biomasse (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	42,3	43,1	- 0,8
Terres cultivées	25,8	22,6	+ 3,2
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,6	6,4	+ 0,2
Terrains bâtis	5,1	4,7	+ 0,4
Total	89,6	86,5	+ 3,1

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 64

L'intensité carbone des produits exportés est également égale à $5 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ pour le scénario biomasse. L'intensité carbone de l'électricité exportée est égale à $1 \cdot 10^{-4}$ MtCO₂/GWh, également trois fois plus faible que celle du scénario de référence. La diminution originale de l'Empreinte de production des émissions de combustibles est alors partiellement annulée par la diminution de l'Empreinte carbone des exportations (voir Tableau 29).

Tableau 29: EE_c pour le scénario biomasse en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	25,2	82,5	75,0	32,7
Commerce international en électricité	-	2,6	0,3	2,2
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	32,5	85,1	75,3	42,3

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 64

L'impact du scénario ER sur l'Empreinte écologique belge

Le scénario des énergies renouvelables vise une production d'électricité à 100% issue de l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire PV. Je me baserai sur les estimations du potentiel technique électrique par vecteur d'énergie renouvelable de Daniel Comblin, qui s'est notamment basé sur les projections d'EDORA, la fédération des producteurs d'énergie renouvelable (Comblin 2011, p.64). Sur base de ces estimations, je déterminerai la production maximale d'électricité par ces énergies renouvelables. Je supposerai que le restant de l'énergie soit produit à partir de biomasse (produite en Belgique ou importée si nécessaire, scénario ERbiomasse), ou importé en termes d'électricité (ERélectricité).

L'impact du scénario ERbiomasse sur l'Empreinte écologique belge

Vu l'incertitude concernant le biogaz dans les chiffres d'Eurostat, je supposerai que l'entièreté de la production actuelle sur base de biomasse soit issue de biomasse solide et des déchets municipaux et industriels. Je partirai de l'hypothèse que la production par biométhanisation utilise le maïs comme matière primaire. Je me baserai à nouveau sur les projections du National Renewable Energy Action Plan (NREAP) pour 2020 pour déterminer la quantité maximale de biomasse disponible en Belgique et je supposerai que le restant soit importé sous forme de maïs ou sous forme de granulés de bois (voir Tableau 62 en annexe 4).

Tableau 30 montre le résultat des calculs. L'EE du scénario ERbiomasse est plus élevée que celle du scénario de référence : $+ 4 \cdot 10^6$ ha_g, malgré la diminution de l'Empreinte carbone. La différence est surtout due à l'augmentation de l'Empreinte des terres cultivées. La surface des terrains bâtis augmente suivant l'hypothèse que les panneaux solaires PV et les éoliennes sont construits sur des anciennes terres cultivées. Si on supposerait que les panneaux solaires PV soient placés sur des toits, l'Empreinte serait moins importante.

Tableau 30: EE pour le scénario ERbiomasse en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario ERbiomasse (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	42,0	43,1	- 1,0
Terres cultivées	25,1	22,6	+ 2,5
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,6	6,4	+ 0,2
Terrains bâtis	5,9	4,7	+ 1,2
Total	89,4	86,5	+ 2,9

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 69

L'intensité carbone des produits exportés est égale à $4 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ pour le scénario ERbiomasse. L'intensité carbone de l'électricité exportée est égale à $1 \cdot 10^{-4}$ MtCO₂/GWh, également trois fois plus faible que celle du scénario de référence. Tableau 31 démontre effectivement que la diminution originale de l'Empreinte de production des émissions de combustibles est encore plus importante, mais qu'elle est affaiblie par la diminution de l'Empreinte carbone des exportations.

Tableau 31: EE_c pour le scénario ERbiomasse en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	24,0	82,5	74,1	32,4
Commerce international en électricité	-	2,6	0,3	2,3
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	31,3	85,1	74,5	42,0

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 69

L'impact du scénario ERélectricité sur l'Empreinte écologique belge

Pour ce scénario, je me baserai à nouveau sur le potentiel technique de l'énergie éolienne, solaire PV, et hydraulique pour déterminer la capacité et la production visée et à installer (voir Tableau 66 et Tableau 67 en annexe 4).

Tableau 32 montre les résultats du calcul de l'EE du scénario ERélectricité. L'EE pour ce scénario est considérablement plus importante que celle du scénario de référence : $+ 5,6 \cdot 10^6$ ha_g. Cette augmentation est surtout due à l'augmentation de l'Empreinte carbone.

Tableau 32: EE pour le scénario ERélectricité en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario ERélectricité (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	47,8	43,1	+ 4,7
Terres cultivées	22,6	22,6	0
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	0
Terrains bâtis	5,5	4,7	+ 0,8
Total	92,1	86,5	+ 5,6

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 69

L'intensité carbone des produits exportés est égale à $4 \cdot 10^{-5}$ tCO₂/GJ pour le scénario ERélectricité. L'intensité carbone de l'électricité exportée est égale à $2 \cdot 10^{-4}$ MtCO₂/GWh, un tiers plus faible que celle du scénario de référence. Tableau 33 montre le détail de l'Empreinte carbone. La diminution originale de l'Empreinte de production des émissions de combustibles est encore plus importante, mais elle est affaiblie par la diminution de l'Empreinte carbone des exportations. Puis l'EE liée aux importations d'électricité est quasiment quadruplée par rapport au scénario de référence. Il est important de remarquer que le bouquet énergétique du pays d'où on importe, influence fortement ce résultat. Vu que dans les CNE, un facteur constant est utilisé, l'EE ne tient pas compte des différences au niveau du bouquet énergétique des pays exportateurs.

Tableau 33: EE_c pour le scénario ERélectricité en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	24,2	82,5	74,3	32,4
Commerce international en électricité	-	8,6	0,6	8,0
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	31,5	91,1	74,8	47,8

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans Tableau 69

2 L'impact de différents scénarios d'URE électrique sur l'Empreinte écologique belge

Daniel Comblin détermine dans son étude sur les possibilités à sortir du nucléaire tout en diminuant les émissions de CO₂ en Belgique, deux scénarios de réduction de consommation électrique. Le scénario « *stabilisation* » prévoit une réduction de 7% en 2030 et le scénario « *réduction* » prévoit une réduction de 24% en 2030 (Comblin 2011, p.3). Je supposerai qu'une telle diminution entraîne une baisse équivalente en termes de production d'électricité. Partant de l'hypothèse qu'une telle diminution aurait été possible pour l'année 2007, j'étudierai l'impact sur l'EE de ces deux scénarios. Pour chaque scénario, j'étudierai la situation où la diminution de production d'électricité se fait de façon proportionnelle pour toutes les énergies primaires (scénario UREstab.-norm. et URErd.-norm.). Puis j'étudierai également la situation où les ER sont favorisées, et où la diminution de la production se fait donc davantage au niveau des autres énergies primaires (UREstab.-ER et URErd.-ER).

Tableau 34 et Tableau 35 montrent l'EE pour le scénario de stabilisation et de réduction de la production d'électricité, en supposant que la diminution de production se fait de façon proportionnelle pour toutes les énergies primaires. Le scénario de stabilisation induit une diminution de l'EE de $0,8 \cdot 10^6$ ha_g, qui est surtout due à la baisse de l'Empreinte carbone et, à une moindre mesure, de la réduction des terres cultivées. Pour le scénario de réduction, la diminution de l'EE s'élève à $2,8 \cdot 10^6$ ha_g. Une baisse de la production d'électricité de 24% entraîne alors une diminution de l'Empreinte carbone d'environ 6% et une diminution de l'EE d'environ 3%.

Tableau 34: EE pour le scénario UREstab.-norm. en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario ER _{stab.-norm.} (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	42,3	43,1	- 0,8
Terres cultivées	22,5	22,6	- 0,08
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	- 0,003
Terrains bâtis	4,7	4,7	- 0,03
Total	85,7	86,5	- 0,8

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans

Tableau 73

Tableau 35: EE pour le scénario UREréd.-norm. en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario UREréd.-norm. (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	40,7	43,1	- 2,4
Terres cultivées	22,3	22,6	- 0,3
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	- 0,01
Terrains bâtis	4,6	4,7	- 0,1
Total	83,7	86,5	- 2,8

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans

Tableau 74

Contrairement aux scénarios présentés précédemment, la diminution de l'Empreinte carbone de la production n'est pas affaiblie par une baisse de l'Empreinte carbone exportée. La diminution de production d'électricité entraîne une diminution équivalente des émissions de CO₂, ce qui fait que l'intensité carbone de la production domestique ne change pas. Néanmoins, comme le montrent Tableau 36 et Tableau 37, l'Empreinte carbone des exportations augmente. Cette augmentation est provoquée par le fait que l'intensité carbone des exportations est calculée sur base des intensités carbone des importations et de la production domestique. L'intensité carbone des importations est calculée à partir d'un facteur constant, l'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale, et est beaucoup plus importante que l'intensité carbone de la production domestique. Vu que la production domestique diminue par rapport aux importations, l'apport de l'intensité carbone des importations dans le calcul de l'intensité carbone des exportations devient plus important, ce qui explique l'augmentation de l'intensité carbone des exportations.

Tableau 36: EE_c pour le scénario UREstab.-norm. en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	28,3	82,5	77,8	33,8
Commerce international en électricité	-	2,6	0,7	1,9
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	35,7	85,1	78,4	42,3

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans

Tableau 73

Tableau 37: EE_c pour le scénario UREréd.-norm. en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	27,3	82,5	78,5	31,3
Commerce international en électricité	-	2,6	0,7	1,9
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	34,6	85,1	79,1	40,5

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans

Tableau 74

Tableau 38 et Tableau 39 présentent les résultats des calculs pour les scénarios de réduction et de stabilisation de la production, qui favorisent les ER. La diminution de la production se fait donc davantage pour les énergies fossiles et nucléaires. La réduction en termes d'Empreinte écologique est plus faible que pour les scénarios avec diminution proportionnelle des énergies primaires, malgré le fait que le bilan en termes d'Empreinte carbone est plus positif. Ce résultat est dû à l'absence de diminution de l'Empreinte des terres cultivées et à la diminution plus faible de l'Empreinte des terrains bâtis.

Tableau 38: EE pour le scénario UREstab.-ER en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario ER _{stab.-ER} (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	42,3	43,1	- 0,8
Terres cultivées	22,6	22,6	0
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	0
Terrains bâtis	4,7	4,7	- 0,02
Total	85,8	86,5	- 0,7

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans
Tableau 75 et Tableau 77

Tableau 39: EE pour le scénario UREréd-ER en Belgique en 2007

Type de sol	EE _{cons} scénario ER _{réd.-ER} (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} référence (10 ⁶ ha _g)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	40,5	43,1	- 2,6
Terres cultivées	22,6	22,6	0
Pâturages	7,3	7,3	0
Surfaces de pêche	2,5	2,5	0
Forêts	6,4	6,4	0
Terrains bâtis	4,6	4,7	- 0,05
Total	83,9	86,5	- 2,6

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans
Tableau 76 et Tableau 77

Contrairement aux scénarios présentés précédemment, la diminution de l'Empreinte carbone de production est amplifiée par une augmentation de l'Empreinte carbone des exportations (voir Tableau 40 et Tableau 41). Elle est due à une augmentation artificielle de l'intensité carbone des produits exportés, liée à la méthode de calcul du TPES de la production d'électricité (voir annexe 4 pour les détails).

Tableau 40: EE_c pour le scénario UREstab.-ER en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	28,4	82,5	77,8	33,1
Commerce international en électricité	-	2,6	0,7	1,9
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	36,1	85,1	78,4	42,3

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans
Tableau 75 et Tableau 77

Tableau 41: EE_c pour le scénario URErd-ER en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	27,3	82,5	78,5	31,2
Commerce international en électricité	-	2,6	0,7	1,9
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	34,6	85,1	79,1	40,5

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon les données présentées dans
Tableau 76 et Tableau 77

3 Comparaison des différents scénarios de production d'électricité belge

Tableau 42 et Graphique 11 résument les EE des différents bouquets électriques. Le scénario nucléaire est le seul scénario qui présente une EE plus faible que le scénario de référence, grâce à son Empreinte carbone nettement plus réduite. Le scénario biomasse et le scénario ERbiomasse présentent également des Empreintes carbones plus faibles, mais cette diminution est compensée par une augmentation importante des terres cultivées, et, en moindre mesure, des terrains bâtis. Le scénario ERélectricité connaît l'EE la plus élevée, qui est surtout due à l'Empreinte carbone. L'EE des terrains bâtis est aussi relativement importante. L'Empreinte carbone élevée pour ce scénario s'explique par la grande quantité d'électricité importée : 37 TWh, tandis que les importations réelles en 2007 n'étaient que de 16 TWh. De plus, les émissions de CO₂ incorporées dans cette électricité sont calculées à partir d'un facteur d'intensité carbone de l'électricité régionale, qui est égale à 0,6 tCO₂/GWh. L'intensité carbone de l'électricité domestique était, par contre, égale à 0,2 tCO₂/GWh pour le scénario de référence et à 0,0 tCO₂/GWh pour le scénario ER.

La conclusion la plus importante reste néanmoins le constat que l'impact du bouquet électrique sur l'EE belge est assez limité, malgré le fait que les scénarios testés sont assez extrêmes. La variation maximale ne

concerne que 6% de l'EE totale.

Tableau 42: Comparaison de l'EE pour différents bouquets électriques en Belgique en 2007

Type de sol	EE réelle (référence) (10 ⁶ ha _g)	EE scénario fossile (10 ⁶ ha _g)	EE scénario nucléaire (10 ⁶ ha _g)	EE scénario biomasse (10 ⁶ ha _g)	EE scénario ERbiomasse (10 ⁶ ha _g)	EE scénario ERélectricité (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	43,1	44,9	41,9	42,3	42,0	47,8
Terres cultivées	22,6	22,6	22,6	25,8	25,1	22,6
Pâturages	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Surfaces de pêche	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Forêts	6,4	6,4	6,4	6,6	6,6	6,4
Terrains bâtis	4,7	4,8	4,7	5,1	5,9	5,5
Total	86,5	88,5	85,4	89,6	89,4	92,1

Source : Tableau 23, Tableau 25, Tableau 27, Tableau 29, Tableau 31 et Tableau 33

L'impact des différents scénarios URE sur l'EE belge est présenté par Tableau 43 et Graphique 12. Tous les scénarios de stabilisation et de réduction sont plus avantageux en termes d'EE que le scénario de référence. Les scénarios à réduction proportionnelle des énergies primaires ont un impact légèrement plus réduit que les scénarios qui favorisent les ER. Bien que l'Empreinte carbone soit plus faible pour les scénarios qui favorisent les ER, l'EE totale est plus élevée en raison de l'Empreinte des terres cultivées relativement importante.

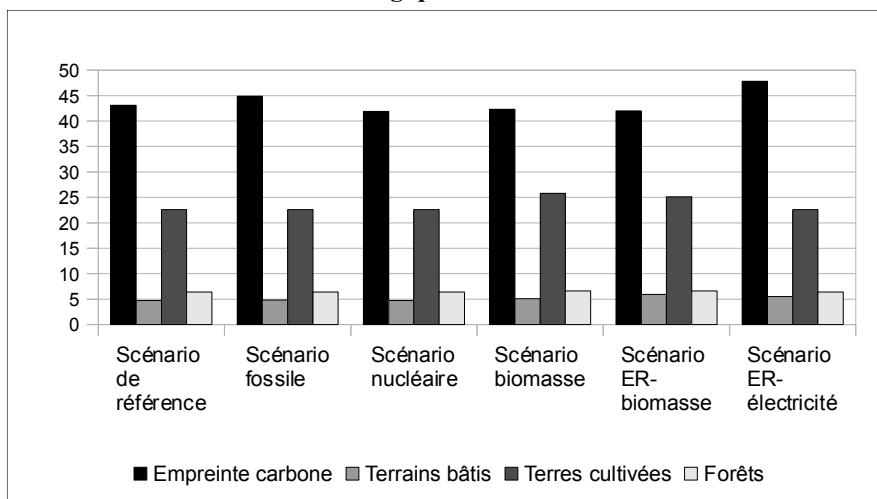
A nouveau, l'impact des différents scénarios est assez réduit, avec une variation maximale de 3% de l'EE totale.

Tableau 43: Comparaison de l'EE pour les scénarios d'URE électrique en Belgique en 2007

Type de sol	EE réelle (référence) (10 ⁶ ha _g)	EE scénario UREstab.-norm. (10 ⁶ ha _g)	EE scénario UREréd.-norm. (10 ⁶ ha _g)	EE scénario UREstab.-ER. (10 ⁶ ha _g)	EE scénario UREréd.-ER (10 ⁶ ha _g)
Empreinte carbone	43,1	42,3	40,7	42,3	40,5
Terres cultivées	22,6	22,5	22,3	22,6	22,6
Pâturages	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Surfaces de pêche	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Forêts	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Terrains bâtis	4,7	4,7	4,6	4,7	4,6
Total	86,5	85,7	83,7	85,8	83,9

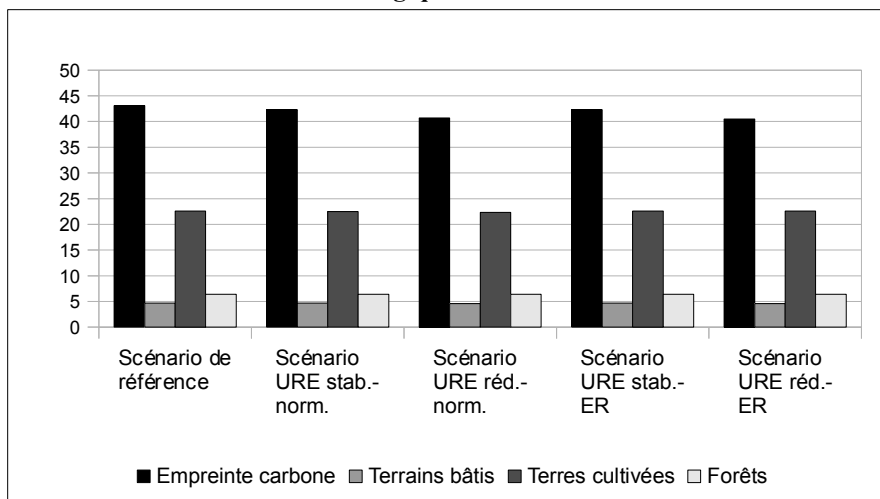
Source : Tableau 23 et Tableau 34 - Tableau 39

Graphique 11: Comparaison de l'EE pour différents bouquets électriques en Belgique en 2007



Source : Tableau 42

Graphique 12: Comparaison de l'EE pour les scénarios d'URE électrique en Belgique en 2007



Source : Tableau 43

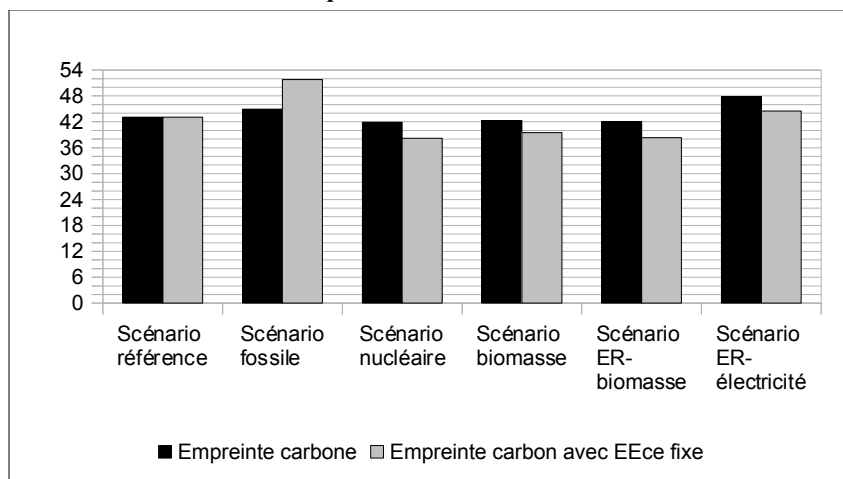
4 Discussion des résultats

Les scénarios présentés ici dépendent fortement des calculs élaborés dans le chapitre précédent. Les incertitudes et critiques sur ces calculs, s'appliquent donc également aux scénarios présentés. Il convient de rappeler ici que les scénarios sont déterminés à partir des intensités d'EE originale et ne tiennent donc pas compte des hypothèses alternatives, ni des besoins de stockage. Il faut donc notamment garder à l'esprit le haut niveau d'incertitude quant aux impacts en termes d'émissions de CO₂ de N1+N2 des différentes filières de la biomasse, ainsi que le fait que les terrains bâtis pour l'énergie éolienne, hydraulique et solaire PV sont probablement surestimés. Finalement, l'EE ne tient pas compte non plus des pollutions radioactives ou du

risque d'accident majeur pour l'énergie nucléaire (voir Discussion des résultats : incertitudes et critiques, p. 75).

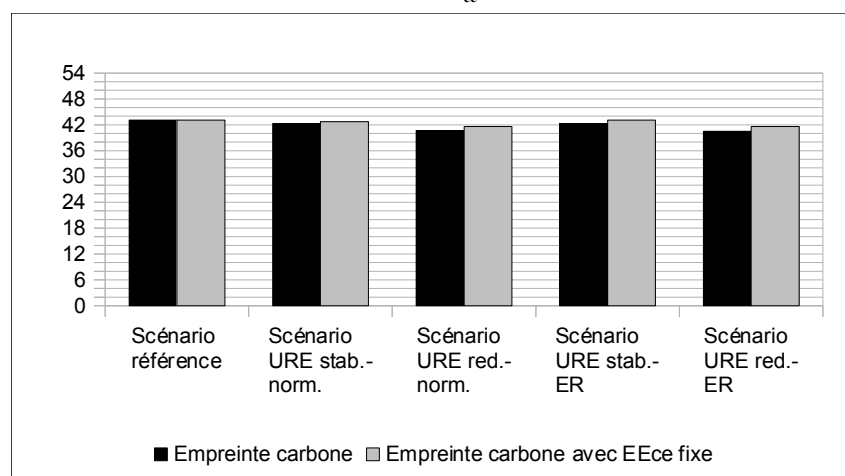
A première vue, l'analyse des scénarios suggère qu'il vaut mieux miser sur une réduction de la consommation électrique que sur un changement du bouquet électrique, pour réduire l'EE belge. Mais une analyse plus approfondie démontre que la réduction de l'Empreinte carbone liée à la production belge est beaucoup plus importante pour le scénario nucléaire, biomasse, ERélectricité et ERbiomasse. Néanmoins, cette diminution est partiellement annulée par la diminution de l'Empreinte carbone exportée, tandis que pour les scénarios URE, les exportations sont amplifiées par une augmentation artificielle de l'intensité carbone. L'importance des importations et des exportations par rapport à la production belge amplifie fortement l'effet de ce mécanisme. Plus la variation de l'Empreinte carbone de production est grande, plus l'effet est atténué. Même selon l'hypothèse très extrême d'une production d'électricité sans aucune émission de CO₂, l'Empreinte carbone totale ne diminue que de 3%. Pourtant les émissions de la production belge diminuent alors de 18% (voir Tableau 79 en annexe 4). Afin de visualiser l'impact, j'ai recalculé les Empreintes carbones des différents scénarios avec une Empreinte carbone des exportations fixe, égale à celle du scénario de référence. Graphique 13 et Graphique 14 permettent de comparer l'Empreinte carbone pour les différents scénarios avec et sans Empreinte carbone des exportations fixe.

Graphique 13: Comparaison de l'EEc pour différents bouquets électriques sans et avec EE_{ce} fixe



Source : Tableau 23, Tableau 27, Tableau 29, Tableau 31, Tableau 33, Tableau 37 et Tableau 41 et calculs propres pour les scénarios à EE_{ce} fixe

Graphique 14: Comparaison de l'EEc pour différents scénarios URE sans et avec EE_{ce} fixe



Source : Tableau 23, Tableau 27, Tableau 29, Tableau 31, Tableau 33, Tableau 37 et Tableau 41 et calculs propres pour les scénarios à EE_{ce} fixe

Tableau 44 montre l'effet sur l'EE totale des Empreintes carbone recalculées avec une Empreinte carbone des exportations fixe. Ce tableau synthétise également les constats les plus importants. Bien que l'EE des scénarios URE augmente un peu, ces scénarios restent quand même les scénarios les plus avantageux. Comme dit précédemment, plus la variation de l'Empreinte carbone de la production est grande, plus elle est atténuée. Il n'est pas surprenant alors de constater que le scénario nucléaire devient le scénario le plus avantageux en termes d'EE. L'EE du scénario fossile, par contre, augmente sensiblement et atteint le niveau le plus élevé. Le mécanisme d'atténuation des variations de l'Empreinte carbone, défavorise les scénarios à réduction d'Empreinte carbone, qui connaissent en contrepartie une augmentation en terres cultivées. Ou, autrement dit, dans les CNE, une variation en terres cultivées, en forêts ou en terrains bâtis est comptabilisée davantage qu'une variation en Empreinte carbone. On constate effectivement que les scénarios ER-biomasse et biomasse montent dans le classement. Le scénario ER-biomasse devient même plus avantageux que le scénario de référence. Le scénario UREstab.-ER descend dans le classement et devient tout juste moins avantageux que le scénario de référence.

Pour les scénarios recalculés, la variation par rapport au scénario de référence augmente de 3 à 5% pour les scénarios URE et de 6 à 10% pour les différents bouquets électriques. L'amélioration maximale, induite par le scénario nucléaire, serait de 5%. L'impact sur l'EE reste alors assez réduit, malgré que le scénario soit assez extrême.

Tableau 44: Classement des différents scénarios de production d'électricité selon l'importance de l'EE

Scénario	EE (10 ⁶ ha _g)	Scénario	EE avec EE _{ce} fixe (10 ⁶ ha _g)
Scénario UREred.-norm.	83,7	Scénario 100% nucléaire	81,8
Scénario UREred.-ER	83,9	Scénario UREred.-norm.	84,7
Scénario 100% nucléaire	85,4	Scénario UREred.-ER.	85,0
Scénario UREstab.-norm	85,7	Scénario 100% ER + biomasse	85,7
Scénario UREstab.-ER	85,8	Scénario UREstab.-norm	86,1
Scénario référence (situation réelle belge en 2007)	86,5	Scénario référence (situation réelle belge en 2007)	86,5
Scénario 100% fossile	88,5	Scénario UREstab.-ER	86,6
Scénario 100% ER + biomasse	89,4	Scénario 100% biomasse	86,8
Scénario 100% biomasse	89,6	Scénario 100% ER + importations électricité	88,8
Scénario 100% ER + importations électricité	92,1	Scénario 100% fossile	95,4

Source : Tableau 23, Tableau 25, Tableau 27, Tableau 29, Tableau 31, Tableau 33 et Tableau 34 - Tableau 39, recalculé pour un EE_{ce} fixé à l'EE_{ce} du scénario de référence

Conclusions

1 *Discussion des principaux résultats*

Un des principaux objectifs du présent MFE était de comparer l'impact de la production d'électricité issue de différentes énergies primaires sur l'Empreinte écologique (EE). Afin de permettre cette comparaison, j'ai calculé, dans le chapitre 2, l'intensité d'EE de la production d'électricité par énergie primaire. L'intensité d'EE exprime le nombre d'hectares globaux nécessaire à la production d'un TWh_e par an. J'ai utilisé l'approche par composants, qui consiste à déterminer tous les flux biophysiques nécessaires à cette production et à calculer ensuite leur impact sur base des études ACV. La précision des résultats est assez limitée, en raison des nombreuses hypothèses et conversions qui sous-tendent les calculs de l'EE. Les résultats dépendent également fortement des estimations des facteurs d'intensité énergétique, d'intensité carbone et de séquestration de CO₂, ainsi que de la fiabilité des données de base. En effet, les résultats des études ACV ne s'avéraient pas toujours cohérents, à cause des différences de délimitation du champ étudié, des conditions climatiques dans lesquelles les technologies étaient étudiées, des hypothèses sur le bouquet énergétique du pays où les matériaux étaient produits, des estimations de la durée de vie des infrastructures...

Néanmoins, les différences d'intensité d'EE sont assez marquées et permettent de déterminer des tendances claires. La production d'électricité sur base d'énergie hydraulique et éolienne présente l'intensité d'EE la plus faible, d'environ 10.000 à 15.000 ha_g par TWh_e annuel. La production sur base d'énergie solaire PV nécessite environ 100.000 ha_g par TWh_e annuel. Pour la production à partir des énergies fossiles, la production sur base du gaz naturel et sur base du charbon demande respectivement environ 150.000 et 300.000 ha_g par TWh_e annuel. Depuis l'édition 2008 des Comptes Nationaux d'Empreinte (CNE), l'Empreinte nucléaire n'est plus calculée, car il y a trop de controverses sur sa méthode de calcul. Certains chercheurs estiment qu'elle est négligeable, tandis que d'autres proposent de la fixer à un niveau équivalent à celui de la production sur base des énergies fossiles. Ici, j'ai décidé de calculer l'Empreinte nucléaire selon la même méthode que pour la production sur base des énergies fossiles, mais je me suis basée sur des études ACV sur les centrales nucléaires. Selon cette méthode, la production sur base d'énergie nucléaire nécessite environ 20.000 ha_g par TWh_e annuel. Il faut néanmoins garder à l'esprit que l'énergie nucléaire entraîne de nombreux impacts qui ne sont pas comptabilisés dans l'Empreinte écologique, telles que les émissions radioactives ou le risque d'accident majeur. La production d'électricité sur base de biomasse présente un bilan très mitigé. En effet, les coefficients d'émission de CO₂ diffèrent énormément, impliquant un impact de 20.000 à 625.000 ha_g par TWh_e annuel. Il s'agit effectivement d'une énergie primaire à différentes filières très diverses. Une analyse plus approfondie est nécessaire afin de déterminer l'impact des différentes filières de façon adéquate.

Une analyse des composants de l'EE démontre qu'il y a des grandes différences dans la composition de l'intensité d'EE pour chaque énergie primaire. Pour la production d'électricité sur base des énergies fossiles,

la plus grande partie de l'EE est constituée par les émissions de CO₂ liées à l'extraction, la préparation, le traitement, le transport, la combustion et la fin de vie du combustible. Pour les énergies renouvelables, ce sont surtout les terrains bâtis et l'énergie incorporée dans les infrastructures qui sont importants. Ainsi, les possibilités de réduction de l'intensité d'EE sont beaucoup plus grandes pour les ER que pour les énergies fossiles. En effet, j'ai testé plusieurs scénarios qui démontrent qu'une valorisation des réservoirs hydrauliques pour la récréation ou la gestion de l'eau, l'emplacement des panneaux PV sur le toit des bâtiments existants ou la valorisation de la surface où des éoliennes sont installées pour le pâturage, diminuerait considérablement l'EE de ces modes de production d'électricité. De plus, le bouquet énergétique d'un pays influence fortement l'Empreinte carbone de l'énergie incorporée dans les matériaux et l'énergie directe nécessaire à la construction des installations et des infrastructures nécessaires à la production d'électricité. Si le bouquet énergétique d'un pays devient moins intensif en carbone, cette Empreinte diminuera aussi. Ainsi, l'EE de la production d'électricité issue des ER pourrait encore diminuer davantage. Evidemment, l'EE de la production d'électricité sur base des énergies fossiles pourrait également diminuer grâce aux améliorations des rendements, aux technologies plus propres et au développement des technologies de CCS. Ces évolutions demanderont néanmoins d'importants investissements et il n'est pas du tout certain qu'on pourrait parvenir à des EE comparables à celles des ER.

Dans le chapitre 3 j'ai ensuite calculé l'impact de différents scénarios de production d'électricité sur l'EE belge. Les calculs ont été effectués selon la méthode et avec les fichiers excel des Comptes Nationaux d'Empreinte (CNE), édition 2010, portant sur la Belgique et sur l'année 2007. Pour les scénarios testés, il s'agit de quatre scénarios concernant le bouquet électrique et quatre scénarios d'utilisation rationnelle d'énergie (URE) électrique. L'EE de chaque scénario est comparée à celle du scénario de référence, la situation de production d'électricité réelle en Belgique en 2007. Les scénarios concernant le bouquet électrique consistent en un scénario où la production d'électricité se fait à 100% sur base d'énergies fossiles (scénario fossile), à 100% sur base d'énergie nucléaire (scénario nucléaire), à 100% sur base de biomasse (scénario biomasse) et à 100% sur base d'énergies renouvelables (scénario ER). Les scénarios URE concernent un scénario qui vise une réduction de la production de 7% (scénario UREstab.) et un scénario qui vise une baisse de 24% de la production d'électricité (scénario UREréd.). Pour chacun de ces scénarios, j'ai testé un scénario à diminution proportionnelle de la production d'électricité par énergie primaire (scénarios UREstab.-norm. et UREréd.-norm.) et un scénario qui favorise les ER (scénarios UREstab.-ER et UREréd.-ER). Pour le deuxième scénario, la diminution de la production d'électricité se fait donc davantage au niveau de la production issue des énergies fossile et de l'énergie nucléaire. Cinq scénarios permettent de diminuer l'EE belge : le scénario nucléaire entraîne la plus grande diminution. Puis, les scénarios URE induisent également une baisse de l'EE belge, sauf le scénario UREstab.-ER. Ceci s'explique par la diminution de l'apport nucléaire, qui a une EE très favorable, et l'augmentation des terrains bâtis. Afin qu'un changement de

cap vers une production sur base d'ER puisse avoir des effets positifs, il doit par conséquent être accompagné par une politique d'URE assez ambitieuse. En ce qui concerne le scénario ER, je me suis basée sur le potentiel maximal techniquement réalisable de la production d'électricité hydraulique, éolienne et sur base du solaire photovoltaïque (PV). J'ai testé un scénario où le restant de l'énergie nécessaire est assuré par une production issue de biomasse (scénario ERbiomasse) et un scénario où le restant de l'énergie est importé sous forme d'électricité (scénario ERélectricité). Seul le scénario ERbiomasse permet une réduction de l'EE belge. Le scénario ERélectricité connaît un bilan assez négatif, dû à l'intensité carbone élevée de l'électricité importée. Cette intensité est estimée sur base de la production d'électricité régionale et ne reflète donc pas nécessairement la réelle intensité carbone de l'électricité importée.

Néanmoins, ces calculs permettent surtout de mettre en perspective les résultats du chapitre précédent. Malgré les différences marquées d'intensité d'EE pour la production d'électricité issue de différents énergies primaires, l'impact global sur l'EE belge est très limité, bien que les scénarios testés sont assez extrêmes. Même le scénario le plus avantageux, le scénario nucléaire, n'induit qu'une diminution de l'EE de 5%. L'impact des scénarios plus réalistes et plus modérés sera encore plus limité. Ainsi, j'ai calculé une estimation très rudimentaire de l'effet sur l'EE belge des objectifs fixés, dans le cadre des engagements européens sur l'URE et les ER, dans le National Renewable Energy Action Plan (NREAP) et le National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie et al. 2011, p.18; CONCERE 2010, p.92). Tableau 45 montre les résultats. La baisse de l'EE sera égale à environ 1% de l'EE belge actuel.

Tableau 45: Estimation de l'impact sur l'EE belge en 2020 des objectifs du NREAP et du NEEAP

Technologie de production	Production d'électricité brute 2007 (TWh _e)	Estimation 2020 (TWh _e)	Différence (TWh _e)	Différence (10 ⁶ ha _g)
Centrales thermiques conventionnelles	38	23	- 15	- 2,4
Charbon	7	4	-3	- 0,9 ¹⁰³
Gaz naturel	27	8	- 19	- 2,9 ¹⁰⁴
Biomasse + déchets industriels	4	11	+ 7	+ 1,4 ¹⁰⁵
Centrales nucléaires	48	33	- 15	- 0,3¹⁰⁶
Installations éoliennes	1	11	+ 10	+ 0,1¹⁰⁷
Centrales hydroélectriques	2	1	- 1	- 0,015¹⁰⁸
Installations solaires PV	0,006	1	+ 1	+ 0,2¹⁰⁹
Cogénération	-	11	+ 11	+ 1,7¹¹⁰
Total	89	80	- 9	- 0,7

Source : Eurostat 2010, pp.26-27 et pp.34-35 et Comblin 2011, p.75 (colonne 2 et 3 : propres calculs sur base des données présentés dans Tableau 19)

103 $300 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 3 \text{ TWh}_e = 900 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

104 $150 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 19 \text{ TWh}_e = 2.850 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

105 $200 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 7 \text{ TWh}_e = 1.400 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$, selon l'hypothèse qu'il s'agit de bois-énergie selon les coefficients de la CWaPE

106 $20 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 15 \text{ TWh}_e = 300 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

107 $10 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 10 \text{ TWh}_e = 100 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

108 $15 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 1 \text{ TWh}_e = 15 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

109 $150 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 1 \text{ TWh}_e = 150 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$

110 $150 \cdot 10^3 \text{ ha}_g / \text{TWh}_e \cdot 11 \text{ TWh}_e = 1.650 \cdot 10^3 \text{ ha}_g$, selon l'hypothèse qu'une centrale à cogénération a le même impact qu'une centrale au charbon, mais divisé par deux, parce que la moitié de l'énergie est attribué à la production de chaleur.

L'impact très réduit sur l'EE belge totale s'explique en partie par l'importance de l'EE des importations et des exportations par rapport à l'EE de la production belge. La politique énergétique belge doit donc inévitablement être située dans un contexte européen et mondial. En effet, l'influence de l'intensité carbone des importations s'avère très importante. Tableau 46 montre le calcul de l'Empreinte carbone pour le scénario de référence, mais suivant l'hypothèse que les produits importés et l'électricité importée sont originaires des pays avec un bouquet énergétique équivalent au nôtre. Ainsi, l'intensité carbone de l'électricité importée est établie selon l'intensité carbone de la production d'électricité belge et l'intensité carbone des produits importés est également établie selon l'intensité carbone de la production belge. L'influence est considérable. L'Empreinte carbone diminue de 18% par rapport au scénario de référence selon la méthode des CNE. Cette diminution est à 100% attribuable à la diminution de l'Empreinte carbone importée par rapport à l'Empreinte carbone exportée. Un scénario où toute électricité produite et importée serait issue d'énergie solaire PV, hydraulique ou éolienne, impliquerait une Empreinte carbone de seulement $29,4 \cdot 10^6$ ha_g, une réduction d'environ 30% par rapport à l'Empreinte carbone du scénario de référence. L'EE totale diminuerait alors d'environ 15%. Selon cette hypothèse, le scénario ERélectricité deviendrait largement le scénario le plus avantageux.

Tableau 46: EE_c selon une intensité carbone des importations égale à celle de la production belge

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	28,8	62,5	63,6	27,8
Commerce international en électricité	-	0,9	0,5	0,4
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	36,1	63,5	64,1	35,5

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon une intensité carbone de production d'électricité et une intensité carbone des produits exportés fixes

Un autre aspect de la dimension internationale de notre production d'électricité est le fait que les scénarios biomasse et ER nécessitent des importations importantes. Selon les données du NREAP, la production domestique de biomasse pourrait s'élever à 29 TWh_p (voir Tableau 62 en annexe 4). Afin de répondre à la demande annuelle en électricité, il faudrait alors une importation de 254 TWh_p pour réaliser le scénario biomasse. La production d'électricité maximale selon le potentiel maximal techniquement réalisable à partir des ER (solaire PV, éolienne et hydraulique) serait de 52 TWh_e (voir Tableau 66 en annexe 4). Il faudrait alors soit une importation de 37 TWh_e en électricité, soit une importation de 95 TWh_p en biomasse (le restant de la biomasse étant produit en Belgique). La dépendance des importations ne concerne d'ailleurs pas uniquement les scénarios biomasse et ER. Pour l'approvisionnement en pétrole brut, en gaz naturel, en uranium et en charbon, la Belgique dépend même à 100% des pays tiers. Ainsi la dépendance énergétique pourrait être réduite en développant la filière des ER et de biomasse. Néanmoins, l'effet sur l'EE belge

dépend fortement des politiques énergétiques des pays exportateurs d'électricité, comme il a été démontré dans le paragraphe précédent. En ce qui concerne les importations de biomasse, il faudrait une analyse de l'EE mondiale afin de déterminer quel niveau de production mondiale de biomasse serait soutenable. Cette analyse au niveau mondial est d'autant plus importante, vu qu'au niveau national, un mécanisme d'atténuation influence les résultats de l'Empreinte carbone. En effet, une réduction de l'intensité carbone de la production, entraîne également une réduction de l'intensité carbone des exportations. Ainsi, l'effet de la diminution de l'Empreinte carbone de la production est affaibli par une baisse de l'Empreinte carbone exportée. Au niveau mondial, ces réductions sont par contre cumulatives. Ainsi, une évaluation correcte des gains en termes de diminution d'Empreinte carbone devient possible. Ceci permet également une comparaison avec les augmentations éventuelles de l'Empreinte des terrains bâtis, des forêts ou des terres cultivées liées au développement des filières de biomasse et des ER

2 Quel rôle pour l'Empreinte écologique comme indicateur des impacts énergétiques ?

2.1 Analyse des principaux atouts et faiblesses évoqués dans la littérature

Certains auteurs ont suggéré qu'il est préférable de calculer les émissions de CO₂ pour comparer les impacts environnementaux lié à la production d'électricité, au lieu de calculer des EE. En effet, le calcul des émissions de CO₂ implique moins d'hypothèses et donc moins d'incertitude. Néanmoins, l'avantage de l'EE est justement qu'elle inclut, non seulement l'impact des émissions de CO₂, mais également d'autres impacts, tels que les terres nécessaires à cultiver de la biomasse ou à accueillir les infrastructures requises. Ainsi, elle permet de comparer l'impact global des scénarios énergétiques. La pertinence d'une telle approche est évidente si l'on considère que la disponibilité des terres cultivables sera probablement de plus en plus restreinte à cause de la compétition entre différentes utilisations de la terre, en particulier en Europe de l'Ouest (Weiss & Patel 2007, p.138). Un deuxième avantage de l'EE est qu'elle situe la consommation d'un pays dans un contexte international, permettant de déterminer l'impact lié aux importations et exportations. Ainsi, les impacts d'un pays et de ses politiques énergétiques sont révélés, même au-delà de ses frontières. L'influence des politiques énergétiques des autres pays sur l'EE de la consommation nationale devient également visible.

Néanmoins, de nombreuses critiques de l'EE ont été évoquées dans la littérature. Le chapitre 1 résume les principales critiques, dont la plupart ont effectivement été validées par les analyses présentées ici.

Une limite très importante d'ordre méthodologique de l'EE est le fait que de nombreux impacts ne sont pas mesurés. Ainsi, pour la production de biomasse, la dégradation potentielle des terres et l'utilisation de l'eau douce ne sont pas prises en considération. En ce qui concerne la combustion des combustibles fossiles, seules les émissions de CO₂ sont incluses. Les autres pollutions, comme le dioxyde de soufre (SO₂) ou les oxydes d'azote (NO_x) sont négligées. Les émissions des autres GES que le CO₂, comme les émissions de méthane liées à la dégradation de la biomasse dans la zone inondée des barrages hydroélectriques, ne sont pas prises en compte non plus. L'Empreinte nucléaire pose également problème. Elle est exclue des CNE depuis l'édition de 2008, à cause des controverses sur sa méthode de calcul. En effet, l'EE n'arrive pas à comptabiliser ni les pollutions radioactives, ni la notion de risque et favorise ainsi l'énergie nucléaire. Finalement, d'éventuelles atteintes à la biodiversité, provoquée par exemple par l'inondation des surfaces pour les réservoirs hydrauliques ou par la fragmentation des habitats due aux infrastructures et installations, ne sont pas comptabilisées non plus.

L'énergie grise constitue un deuxième point d'attention. En Belgique, l'EE de l'énergie incorporée dans les importations et les exportations est beaucoup plus importante que l'Empreinte de sa propre production. Par conséquent, l'EE belge est très sensible à la méthode de calcul de l'énergie grise incorporée dans les importations et les exportations. Actuellement, dans la méthode de calcul des CNE, le poids d'un produit importé est multiplié par l'intensité énergétique et ensuite par l'intensité carbone. Les catégories de produits ont la même intensité énergétique, quel que soit leur pays d'origine. Cette approche ne tient donc pas compte des différences entre pays en termes d'efficacité énergétique. L'intensité carbone pour les exportations est ensuite basée sur le bouquet énergétique du pays producteur, tandis que l'intensité carbone des importations est basée sur la moyenne mondiale. Une augmentation de l'efficacité énergétique d'un pays n'est donc pas reflétée dans l'EE de ses exportations. Par contre, une diminution de l'intensité carbone du bouquet énergétique d'un pays provoque bien une diminution de l'EE de ses exportations et peut ainsi mener à une augmentation de l'EE des importations nettes. Une dernière remarque sur l'énergie grise est que le secteur de commerce et des services n'est pas pris en compte dans les exportations et les importations, vu que le calcul dans la méthode des CNE se base sur des flux physiques. Ce secteur présente pourtant une consommation d'énergie importante.

Une troisième remarque concerne le fait que l'EE n'est pas un outil de modélisation ou de prévision : elle se base sur des statistiques de la production, les importations et les exportations actuelles. Elle ne permet par conséquent pas d'estimer ni d'évaluer des scénarios futurs, tenant compte de la croissance économique et démographique, des évolutions technologiques... Ainsi, elle n'arrive pas non plus à comptabiliser certains effets cumulatifs, tels que l'épuisement des stocks de combustibles fossiles, l'accumulation des émissions de CO₂ dans l'atmosphère... Les impacts se reflètent au niveau de l'EE seulement quand ces effets atteignent un niveau assez haut pour qu'il y ait des conséquences sur la bioproduktivité des terres ou qu'il y ait un changement forcé dans l'utilisation des combustibles. L'EE ne permet donc pas de déterminer des seuils

critiques. Ce fait, combiné au fait que l'EE démontre que la biocapacité mondiale est dépassée depuis la moitié des années 70, peut induire le leurre qu'on peut continuer à dépasser la biocapacité.

Finalement, une dernière série de critiques concerne la méthode de calcul des impacts des énergies fossiles. Le choix pour la méthode d'assimilation des déchets est beaucoup critiqué parce qu'il néglige le fait qu'il s'agit de l'utilisation d'une ressource non renouvelable et donc non durable à long terme. Puis, la traduction même des émissions de CO₂ en hectares globaux est également sujette à controverse, notamment parce que le taux de séquestration utilisé ne serait pas adéquat. En effet, il y a d'autres puits de carbone que les forêts qui ne sont pas pris en compte et la méthode de calcul ne permet pas de multiples utilisations de la même terre. Une sous- ou surestimation de l'impact des émissions de CO₂ pourrait effectivement favoriser ou défavoriser les scénarios à haute intensité d'Empreinte carbone par rapport aux scénarios à faible intensité carbone, mais qui nécessitent davantage de terres cultivées ou de terrains bâtis en contrepartie.

Finalement l'EE est sujette à une série de critiques conceptuelles, dont il est surtout important de les avoir à l'esprit au moment de l'interprétation des résultats. Tout d'abord il y a les problèmes de substituabilité : on peut gagner en biocapacité en transformant des forêts en terres cultivées ou des pâturages en terrains bâtis, ce qui n'entraîne pas nécessairement le résultat le plus optimal du point de vue environnemental. En effet, les facteurs de rendement (FR) et les facteurs d'équivalence (FEQ), utilisés pour convertir des surfaces en hectares globaux, fonctionnent comme des poids. Les terres cultivées et les terrains bâtis ont par exemple un FEQ égal à 2,51, tandis que les forêts n'ont qu'un FEQ de 1,26. Ceci implique qu'une surface de terre occupée par une production de maïs pour la biométhanisation a deux fois plus d'impact sur l'EE que la même surface utilisée pour la séquestration de CO₂ ou pour la production du bois énergie. Le poids important attribué par les CNE aux terres cultivées (et donc aux terrains bâtis) défavorise la production d'électricité sur base des ER et de la biomasse par rapport aux énergies fossiles, qui occupent peu de terrains bâtis ou de terres cultivées. La pénurie en terres cultivables pourrait justifier ce choix. Le FR et le FEQ reflètent des différences en bioproduktivité. La question reste si ces facteurs reflètent effectivement de façon adéquate la valeur des terres en termes de soutenabilité écologique. En termes d'EE, il n'y aurait, par exemple, pas de différence si on couvrait toute la terre de terrains bâtis ou si on la consacrait entièrement aux terres cultivées. En termes de biodiversité ou de production alimentaire, la différence serait pourtant immense. Ce serait intéressant d'inclure dans ces facteurs non seulement la productivité, mais également la notion de rareté ou de besoin d'un certain type de sol. Ainsi, le poids attribué à chaque type d'impact reflète les besoins et les risques actuels. Ce poids serait évidemment variable au fil du temps et devrait par conséquent être réévalué régulièrement.

Ensuite plusieurs auteurs estiment que l'EE présente un biais contre le commerce et qu'elle se base sur une échelle géographique arbitraire (les frontières des pays). Je crois que cette critique est effectivement fondée pour certaines publications, qui comparaient la biocapacité d'un pays à son EE pour évaluer la soutenabilité

du pays. Cette approche néglige effectivement l'impact de la densité de population et les caractéristiques des pays. Néanmoins, dans les publications récentes, l'EE d'un pays est souvent calculée par personne et comparée à la biocapacité disponible au niveau mondial par personne (ce qui implique la vision implicite qu'une répartition équitable de la biocapacité au niveau mondial est souhaitable). Cette critique ne concerne pas la présente analyse, vu qu'elle ne compare pas des pays, mais des scénarios pour un même pays. Néanmoins, l'analyse démontre que certains facteurs méritent effectivement d'être étudiés à une échelle plus grande que le niveau national. Surtout pour des petits pays qui dépendent fortement des importations et des exportations, des changements en intensité carbone de la production sont fortement atténués par des changements conséquents en intensité carbone des exportations. L'effet sur l'EE mondiale sera alors plus important (en termes absolus) que l'effet sur l'EE nationale.

Une autre critique conceptuelle concerne le scepticisme envers les progrès techniques : l'EE négligerait le fait que des progrès techniques futurs pourraient nous aider à dépasser les limites biophysiques et ainsi des comportements qui sont actuellement insoutenables, se révéleraient quand même soutenables dans le futur. Je crois qu'il faut voir cette critique sous l'angle de l'EE qui n'est pas un outil de modélisation : elle ne permet effectivement pas de prévisions du futur. Par contre, l'EE démontre bien l'insoutenabilité actuelle, ce qui implique un épuisement du stock naturel et une fragilisation des écosystèmes inévitables, quelles que soient les technologies futures.

Finalement, certains auteurs ont jugé que l'EE est un indicateur anthropocentré, étant donné qu'il évalue la nature en termes de son utilité pour l'homme. Ce fait est en même temps une grande force de l'EE, qui la rend très consensuelle pour un public très divers. Néanmoins, ces deux critiques impliquent qu'il reste très important d'évaluer les résultats des estimations d'EE également sous l'angle d'autres critères ou indicateurs, comme par exemple la biodiversité.

2.2 Analyse critique des calculs effectués

Comme détaillée précédemment, la précision des calculs d'intensité d'EE effectués est limitée à cause des nombreuses hypothèses, conversions et des données de base parfois incohérentes. D'autres facteurs contribuent à cette imprécision, notamment le fait que j'ai mélangé dans mes calculs des données nationales et internationales. Pour le calcul de l'Empreinte de $N1+N2$, je me suis basée sur les coefficients d'émission de la CWaPE, tandis que je me suis basée sur l'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale pour le calcul de $N3$. Un autre facteur important, est le fait que certaines hypothèses des CNE ne s'appliquent pas à la situation belge, comme le calcul de la surface inondée pour les centrales hydrauliques. Ce calcul se base sur la production d'électricité et utilise un facteur de conversion moyen mondial. La variation du rapport entre la production d'électricité et la surface inondée est pourtant très grande au niveau mondial. De plus, une grande partie de l'hydroélectricité belge est produite à partir des turbines installées sur des barrages et écluses

existantes et n'impliquant par conséquent pas de surface inondée supplémentaire.

Afin d'améliorer la précision des calculs, il serait important de se baser sur des données nationales, tant au niveau des coefficients d'émissions de CO₂ qu'au niveau des facteurs d'intensité énergétique et d'intensité carbone. Les facteurs d'intensité énergétique et d'intensité carbone des importations devraient également mieux refléter la réalité du pays exportateur. Puis il faudrait aussi tenir compte de la situation réelle en Belgique, notamment par rapport à la surface inondée pour les centrales hydrauliques, mais également par rapport à l'emplacement des panneaux solaires et des éoliennes. La détermination des terres réellement occupées par les infrastructures requises, permettrait d'appliquer un FR et un FEQ plus pertinent. Finalement, il serait également utile de détailler pour la filière biomasse quelles sont les entrées réelles et quels sont alors les coefficients d'émission à appliquer.

La question la plus importante reste néanmoins si le calcul de l'intensité d'EE a une valeur ajoutée par rapport au calcul des différents impacts séparément. L'avantage de ce calcul est le fait qu'on peut exprimer différents impacts en un seul chiffre. Le désavantage est le fait que ce chiffre apparemment simple cache une multitude d'hypothèses. Il faut une compréhension approfondie des mécanismes et des présuppositions afin de pouvoir interpréter les résultats de façon pertinente. De plus, le poids attribué aux différents types de sol par le biais du FEQ, pourrait être pertinent au niveau mondial, mais pas nécessairement au niveau national.

Le calcul de l'EE belge pour les différents scénarios a permis de mettre en perspective les résultats et d'en apercevoir la dimension internationale et la forte dépendance des importations et des exportations. Cela a également rendu possible une évaluation des impacts plus intégrée, tenant compte des limites du potentiel techniquement réalisable et de la production domestique maximale de biomasse. L'interprétation des résultats nécessite pourtant une certaine prudence. Les écarts entre les EE des différents scénarios sont très réduits et la précision est assez limitée. En effet, les calculs sont basés sur les calculs d'intensité d'EE, dont je viens d'évoquer les imprécisions. De plus, le classement des scénarios dépend surtout de leur Empreinte carbone et de leur Empreinte en termes de terres cultivées. Par conséquent, la détermination du taux de séquestration et des FEQ appliqués influence fortement les résultats. Le mécanisme d'atténuation des variations de l'Empreinte carbone de la production, influence également les résultats au niveau national. Finalement, la production d'électricité concerne une partie très réduite de l'EE totale, d'où l'écart très faible entre les différents scénarios. A nouveau, il faut une connaissance approfondie du fonctionnement de l'EE et des hypothèses qui le sous-tendent afin de pouvoir interpréter les résultats.

2.3 Recommandations pour l'évaluation des scénarios de production d'électricité

Afin de permettre une évaluation pertinente et correcte des différents scénarios de production d'électricité pour un seul pays, je crois qu'un outil doit disposer de quatre qualités importantes. Premièrement, l'outil doit inclure tous les impacts les plus pertinents. Puis, les hypothèses qui sous-tendent l'outil doivent être claires et adaptées à la situation spécifique du pays. Le poids (et donc l'appréciation de l'importance) qui est attribué aux différents critères doit être explicité, afin de permettre au décideur de faire un compromis entre critères. De plus, l'importance de certains critères peut évoluer au cours du temps. L'outil doit pouvoir tenir compte de cette évolution. Ensuite, les résultats devraient atteindre un niveau de précision et de détail qui permette un classement correct et une analyse plus approfondie de la contribution des différents critères au classement final. Finalement, l'outil doit posséder une certaine capacité de prédiction des effets des impacts sur le long terme. Je crois que les calculs d'EE effectués ici ne remplissent aucune de ces conditions.

Premièrement, l'EE néglige de nombreux impacts pertinents. Le classement des scénarios est surtout le résultat d'un compromis entre occupation de l'espace et Empreinte carbone. En effet, le raisonnement étant que, pour garantir la soutenabilité écologique, il faut que notre demande en termes de surfaces bioproductives ne dépasse pas la biocapacité. Pourtant, la soutenabilité écologique suppose qu'on ne mette pas en danger la résilience des écosystèmes, afin que leurs services écologiques soient également disponibles pour les générations futures. Ceci implique non seulement d'éviter l'épuisement des stocks à cause d'une demande en terres bioproductives plus élevée que la biocapacité. Il faut également prévenir des atteintes à la biocapacité et au capital naturel support à la vie. En effet, la production d'énergie implique de nombreux impacts qui menacent la biocapacité et le capital naturel support à la vie. Les impacts peuvent être classés en cinq catégories : les pollutions de l'air, de l'eau et du sol, les impacts sur la bioproduktivité des sols, les impacts sur la biodiversité, les apports au réchauffement climatique et les risques liés à la production d'énergie. Les pollutions de l'air, de l'eau et du sol concernent notamment les émissions de dioxyde de soufre, des oxydes d'azote, des poussières et des imbrûlés liées à la combustion des énergies fossiles et de la biomasse, les fertilisants, pesticides et herbicides liés à la production de la biomasse, les déchets nucléaires, les déchets de l'exploitation minière... Les impacts sur la bioproduktivité des sols incluent l'occupation des surfaces cultivables par des cultures ou par des infrastructures, la dégradation des sols suite à une exploitation intensive, l'utilisation de l'eau douce... Les impacts sur la biodiversité concernent notamment la disparition, la fragmentation ou la transformation des habitats, suite à des effets d'acidification ou d'eutrophisation liés aux pollutions et aux fertilisants ou suite à l'implantation des infrastructures. La construction des barrages pour l'hydroélectricité peut, par exemple, mener à la destruction des habitats et des espèces, l'envasement et le déplacement des populations indigènes (Pacca & Horvath 2002, p.3196). Les apports au réchauffement climatique incluent les émissions de CO₂ et d'autres GES liées à la combustion des

combustibles fossiles et de la biomasse et l'émission du méthane par la dégradation de la biomasse inondée par le réservoir des centrales hydrauliques. Finalement, il y a de multiples risques liés à la production d'énergie, telles que les accidents nucléaires, les marées noires, la rupture des barrages... De tous ces impacts, l'EE ne tient compte que des émissions de CO₂ et de l'occupation des terres cultivables.

En ce qui concerne le deuxième critère, le calcul de l'intensité d'EE pour la production d'électricité issue de différentes énergies primaires, ainsi que de l'EE belge pour différents scénarios de production d'électricité, a effectivement permis d'établir un classement selon les impacts environnementaux. Ce classement apparemment simple, cache néanmoins de multiples hypothèses, des conversions et des interactions entre variables, qui rendent son interprétation épineuse. Certaines de ces hypothèses sont pertinentes au niveau mondial, mais ne s'appliquent pas à la situation belge, comme par exemple le calcul de la surface inondée pour les centrales hydrauliques. De plus, la méthode de conversion des émissions de CO₂ en hectares globaux est beaucoup critiquée. Elle est pourtant cruciale, vu que le classement des scénarios est surtout le résultat d'un compromis entre occupation de l'espace et Empreinte carbone.

Pour le troisième critère, le calcul de l'EE belge a démontré que l'EE des importations et des exportations est tellement importante qu'elle voile les effets des variations dans l'EE de la production. De plus, la production d'électricité ne concerne qu'une partie réduite de l'EE. Par conséquent, les variations en EE sont très faibles et permettent peu d'analyse approfondie. Le calcul de l'intensité d'EE permet davantage de détails et l'interprétation est plus simple, vu qu'il n'y a pas d'effets d'interaction entre variables. Néanmoins, il est important de calculer également des scénarios, afin de prendre en compte la réalité du potentiel techniquement réalisable et la situation existante. Une solution aurait été de calculer l'EE des différents scénarios selon l'approche par composants.

Finalement, l'EE est un bon outil pour l'évaluation de l'état actuel de demande en terres productives et pour la surveillance de son évolution. Néanmoins, l'EE permet seulement d'évaluer les impacts au moment où ils se produisent, bien que cela puisse prendre beaucoup de temps avant que, par exemple, les effets du réchauffement climatique se fassent sentir en termes de pertes de biocapacité. Un indicateur, qui essaie d'évaluer les impacts de différents scénarios futurs possibles, devrait être davantage proactif. Il serait alors plus intéressant d'évaluer les scénarios en termes de facteurs qui contribuent à la diminution de la biodiversité qu'en termes de diminution de la biodiversité réelle.

En conclusion, je crois que l'EE est un bon outil pour donner un aperçu global de notre demande en terres bioproductives et pour déterminer les domaines prioritaires d'action. Elle facilite aussi la comparaison entre pays. Par contre, elle ne possède pas les caractéristiques nécessaires pour permettre une évaluation pertinente de différents scénarios énergétiques dans le même pays. Afin de permettre une telle évaluation, il me semble intéressant de déterminer des catégories d'impacts, telles que 'les pollutions de l'air, de l'eau et du sol', 'les

impacts sur la bioproduktivité des sols', 'les impacts sur la biodiversité', 'les apports au réchauffement climatique' et 'les risques liés à la production d'énergie', et d'effectuer une analyse d'aide multicritère à la décision de type PROMETHEE ou GAIA. Contrairement à l'EE, qui est une sorte de somme pondérée, ce genre d'analyse permet de mettre en évidence d'éventuels conflits entre critères et des possibilités de compromis. Elle permet également de définir des préférences, et donc de donner des poids explicites aux critères. De plus, l'analyse n'est pas sensible aux échelles des unités. Contrairement à l'EE, il ne faut donc pas de démarches de normalisation et de conversion, qui impliquent de nombreuses hypothèses et donc des incertitudes.

Liste des principaux sigles utilisés

ACV	Analyse de cycle de vie
BAU	Business as usual
C	Carbone
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCS	Carbon Capture and Storage
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
CONCERE	Concertation état - régions pour l'énergie (Energie-Overleg Staat-Gewesten ENOVER)
CNE	Comptes Nationaux d'Empreinte
CREG	Commission de régulation de l'électricité et du gaz
CSP	Concentrated Solar Power
CWaPE	Commission Wallonne pour l'Energie
DGSIE	Direction générale Statistique et Information économique
EDORA	Fédération de l'Energie d'Origine Renouvelable et Alternative
EE	Empreinte écologique
EE _c	Empreinte carbone
EE _{cc}	Empreinte carbone des exportations
EE _{ci}	Empreinte carbone des importations
EE _{cons}	Empreinte écologique de la consommation nette
EE _e	Empreinte écologique des exportations
EE _i	Empreinte écologique des importations
EE _p	Empreinte écologique de la production primaire
ENOVER	Energie-Overleg Staat-Gewesten (Concertation état - régions pour l'énergie CONCERE)
ER	Energie renouvelable
EREC	European Renewable Energy Council
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).
FC	Fluorocarbures
FEQ	Facteur d'équivalence
FR	Facteur de rendement
GAEZ	Suitability Index of Global Agro-Ecological Zones
GES	Gaz à effet de serre
GEO	Global Energy Observatory

GGI	Greenhouse Gas Inventory
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC)
GJ	GigaJoule (10^9 Joule)
GFN	Global Footprint Network
ha	Hectare
ha _g	Hectare global
ha _m	Hectare mondiale
IBGE	Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat GIEC)
km	Kilomètre
kt	Kilo-tonne
ktCO ₂	Kilo-tonne de CO ₂
ktep	Kilo-tonne d'équivalent pétrole
kWh _p	KiloWatt-heure d'énergie primaire
kWh _e	KiloWatt-heure électrique net produit
Mt	Mégatonne (10^6 tonne)
MtCO ₂	Mégatonne CO ₂ (10^6 tCO ₂)
MW	MégaWatt (10^6 Watt)
MWh _p	MégaWatt-heure d'énergie primaire
MRIO	Multi-Regional Input-Output Model
N1	Les émissions de CO ₂ liées à l'extraction, le transport et le traitement des combustibles
N2	Les émissions de CO ₂ liées à la combustion des combustibles
N3	Les émissions de CO ₂ liées à la construction des infrastructures (énergie et énergie grise contenue dans les matériaux nécessaire à la construction)
NEEAP	National Energy Efficiency Action Plan
NO _x	Oxydes d'azote
NREAP	National Renewable Energy Action Plan
ODE	Organisatie voor Duurzame Energie
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PIB	Produit Intérieur Brut
PJ	PétaJoule (10^{15} Joule)
PLUM	Product Land Use Matrix
PPN	Production primaire nette

PV	Photovoltaïque
PWR	Pressurized water reactor
REP	Réacteur à eau pressurisée
SF ₆	Hexafluorure de soufre
SO ₂	Dioxyde de soufre
t	Tonne
tC	Tonne C
tCO ₂	Tonne CO ₂
TGV	Turbine Gaz-Vapeur
TJ	TéraJoule (10 ¹² Joule)
TPES	Total Primary Energy Supply
TWh	TéraWatt-heure (10 ¹² Watt-heure)
TWh _e	TéraWatt-heure d'énergie électrique
TWh _p	TéraWatt-heure d'énergie primaire
URE	Utilisation Rationnelle d'Energie
UV	Ultraviolet
WRI	World Resources Institute
WWF	World Wildlife Fund

Glossaire¹¹¹

Analyse du Cycle de Vie (ACV) «*life cycle analysis (LCA)*»

Approche quantitative visant à évaluer l'impact sur l'environnement d'un produit pendant toute sa vie. Une ACV essaye de quantifier les flux entrants et sortants au niveau d'un produit, "du berceau à la tombe", y-compris l'énergie et les matériaux associés: à l'extraction de matériaux; à la fabrication et à l'assemblage du produit; à sa distribution; à son utilisation; à la gestion de sa fin de vie; ainsi que les émissions dans l'air, l'eau ou les sols en résultant.

Analyse E/S (Entrées-Sorties) «*IO (Input-Output) analysis*»

L'analyse Entrées-Sorties est un outil mathématique largement utilisé pour analyser les flux de biens et de services au niveau d'une économie, à partir de tableaux d'entrées-sorties. L'analyse E/S suppose que: tout ce qui est produit par une industrie est utilisé par d'autres industries ou des consommateurs finals; les flux de consommation peuvent faire l'objet d'un suivi. Au niveau des études d'EE, l'analyse E/S peut être utilisée pour répartir l'EE entre les différentes activités de production, ou entre les différentes catégories de consommation finale. Elle peut être aussi utilisée pour développer des matrices d'utilisation des sols pour la consommation.

Approche par composants

Méthode de calcul de l'EE qui détermine les flux biophysiques nécessaires à produire tous les biens et services consommés par une population donnée sur base des études d'analyse de cycle de vie (ACV).

Approche « macro »

Méthode de calcul de l'EE qui détermine les flux biophysiques nécessaires à produire tous les biens et services consommés par une population donnée sur base des données statistiques nationales agrégées.

Biocapacité «*biological capacity or biocapacity*»

La capacité des écosystèmes à produire de la matière biologique utile et à absorber les déchets générés par les sociétés humaines, compte-tenu des systèmes de gestion et des techniques d'extraction actuels. "Matière biologique utile" est définie comme de la matière biologique utilisée par l'économie. Aussi, ce qui est considéré comme "utile" peut varier d'une année sur l'autre. Par exemple, l'utilisation de la tige et des feuilles du maïs pour produire de l'éthanol ferait que cette tige et ces feuilles deviendraient une matière biologique utile, et ainsi, la biocapacité du maïs en serait accrue d'autant. La biocapacité d'une surface est calculée en multipliant sa superficie par le facteur de rendement et le facteur de conversion approprié. La biocapacité est

¹¹¹ Repris du GFN 2011 et Ewing, Moore, et al. 2010a, p.106, sauf si une autre référence est citée.

habituellement exprimée en hectares globaux.

Biocapacité disponible par personne *«biological capacity available per person (or per capita)»*

Il y avait 11,9 milliards d'hectares de terres et de surfaces en eau biologiquement productives sur Terre en 2007. En divisant ce nombre par le nombre d'habitants sur Terre à la même date (6,7 milliards), on obtient 1,8 hectares globaux par personne. Il faut réaliser que, ce faisant, on considère en outre que les autres espèces vivantes n'ont pas accès à ces ressources.

Biosphère

La partie vivante de l'écosystème terrestre.

Capacité de charge

La population maximale d'une certaine espèce qui peut être supporté infiniment par un habitat particulier, sans atteindre à titre définitif la productivité de cet habitat.

Capital naturel *«natural capital»*

Le capital naturel peut être défini comme l'ensemble des matières premières et des cycles naturels sur Terre. L'EE prend en compte un composant clé du capital naturel : le capital naturel support de vie ou, sous forme abrégée, le capital écologique.

Capital naturel support à la vie

Le capital naturel support à la vie est défini comme étant le stock de ressource écologiques qui fournissent des biens et des services de manière durable. Les principales fonctions de ce capital comprennent la production de ressources (poissons, bois, céréales), l'assimilation des déchets (absorption du CO₂, traitement des eaux usées) et les services de support à la vie (protection contre les rayonnements UV, biodiversité, filtration de l'eau, stabilisation du climat).

Catégories de consommation *«consumption components (also consumption categories)»*

Les analyses d'EE permettent de répartir l'EE totale entre différents postes de consommation, dont les principaux sont généralement l'Alimentation, le Logement, la Mobilité [p.e. déplacement des personnes], les Biens et les Services. Souvent ces postes sont décomposés de manière plus fine. Ce découpage standard, commun à toutes les études, permet de comparer l'EE des différents postes de consommation entre régions, ainsi que la contribution relative de chaque poste à l'EE totale de la région. Pour éviter un double-comptage, il est important de s'assurer que les consommables sont affectés à un seul poste de consommation. Par exemple, un réfrigérateur peut être affecté au poste Alimentation, ou au poste Logement ou au poste Biens, mais seulement à l'un des trois.

Comptes Nationaux d'Empreinte «*National Footprint Accounts*»

La base de données central qui sert au calcul des EE et aux biocapacités du monde et d'environ 200 pays, pour une période allant de 1961 à aujourd'hui avec, en général, un décalage de 3 ans lié à la disponibilité des données. Le développement permanent, la maintenance et la mise à jour des Comptes Nationaux d'Empreinte sont coordonnés par le Global Footprint Network et ses partenaires (plus de 90).

Consommation «*consumption*»

Utilisation de biens ou de services. Pour l'EE, la consommation réfère à la consommation de biens et de services. Un bien ou un service consommé comprend toutes les ressources, y-compris l'énergie, nécessaires pour le mettre à la disposition du consommateur. Dans cette approche, de type "analyse de cycle de vie", tout ce qui est utilisé au niveau de la chaîne de production est pris en compte, y-compris les pertes. Par exemple, les aliments consommés incluent non seulement les produits végétaux et animaux consommés à la maison, ainsi que les déchets qui en sont issus, mais aussi toutes les pertes lors de la récolte, de la fabrication... ainsi que l'énergie consommées pour cultiver, moissonner, transformer et distribuer les aliments.

Déficit / réserve écologique «*ecological deficit / reserve*»

La différence entre la biocapacité et l'Empreinte Ecologique d'une région ou d'un pays. Un déficit écologique survient lorsque l'EE de la population d'un territoire dépasse la biocapacité de ce territoire. Inversement, une réserve écologique se constitue lorsque la biocapacité du territoire dépasse l'Empreinte écologique de la population vivant sur ce territoire. Dans le cas d'un déficit: soit la population concernée importe de la biocapacité par le biais des importations de produits et de services; soit elle détruit des ressources écologiques. Par contre, un déficit écologique global au niveau de la planète ne peut pas être compensé par des importations: il est donc automatiquement synonyme de dépassement.

Dépassement «*Overshoot*»

Un dépassement global survient lorsque les besoins de l'humanité en ressources naturelles dépassent la production de la biosphère, ou la capacité régénératrice. Un tel dépassement conduit à une érosion du capital naturel qui est la base de toute vie, et /ou à une accumulation des déchets. Au niveau de la planète, le dépassement et le déficit écologique sont des synonymes, dans la mesure où la Terre peut être considérée comme un système fermé. Un dépassement local survient lorsque qu'un écosystème local est exploité à un rythme plus élevé que celui de son renouvellement.

Dette écologique «*ecological debt*»

Depuis le milieu des années 1980, période à partir de laquelle les besoins de l'Homme en biocapacité a dépassé la biocapacité disponible, l'humanité a été en dépassement, avec une EE globale dépassant la biocapacité de la Terre. Avec des besoins supérieurs à la biocapacité disponible, l'humanité accumule une

dette écologique. Cette dette est la somme de tous les déficits annuels.

Développement soutenable/durable

Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.

Double comptage «*double counting*»

Afin de ne pas sur-évaluer l'impact de l'homme sur la nature, les comptes de l'EE évitent les doubles-comptages, par exemple compter le même espace deux fois. Les erreurs de double comptage peuvent survenir de différentes manières: en additionnant les EE le long d'une chaîne de production, par exemple blé, farine, pain, il faut faire attention à ne pas compter deux fois le transport du blé de la ferme au moulin (une fois au niveau de la ferme et une fois au niveau du moulin); de la même manière, des erreurs similaires, quoique moins importantes, peuvent survenir lorsque le produit fini de la chaîne de production analysée intervient lui-même dans la chaîne de production (exemple: chaîne de fabrication de camions – des camions sont utilisés pour transporter les pièces des sous-traitants à l'usine d'assemblage); enfin, lorsque qu'un sol a deux usages (récolte de blé d'hiver et récolte de maïs en automne), il est important de ne pas compter l'espace correspondant deux fois (par contre, le facteur de rendement est ajusté pour refléter la plus grande productivité).

Ecosphère

L'ensemble formé par la biosphère, la lithosphère et l'atmosphère.

Empreinte carbone «*carbon Footprint*»

Dans le contexte des études d'Empreinte Ecologique, ce terme est synonyme de l'EE liée aux consommations d'énergies fossiles, exprimée en surface de forêts théoriquement nécessaire pour séquestrer la partie du CO₂ émise dans l'atmosphère lors de la combustion des énergies fossiles et qui n'est pas assimilée par les océans

Empreinte Ecologique «*Ecological Footprint*»

Une mesure de la quantité d'espace biologiquement productif (sur terre ou en eaux) dont une personne, une population ou une activité ont besoin pour produire toutes les ressources consommées et pour absorber tous les déchets produits, compte-tenu des technologies disponibles et des pratiques de gestion mise en œuvre. L'EE est habituellement mesurée en hectares globaux. Dans la mesure où le commerce est aujourd'hui largement international, l'EE d'une personne ou d'un pays intègre des espaces provenant d'un peu partout dans le monde. L'expression "Empreinte Ecologique" est souvent abrégée en "Empreinte" (pas "empreinte").

Empreinte écologique de la consommation *«consumption Footprint»*

Le type d'EE le plus fréquemment étudié. C'est la mesure de la superficie nécessaire pour soutenir la consommation d'une population donnée. L'EE de la consommation (en ha_g) inclut les superficies nécessaires pour produire les matériaux consommés et absorber les déchets produits. L'EE de la consommation d'un pays est calculée dans les Comptes Nationaux d'Empreinte de la manière suivante: EE de la production + EE des importations – EE des exportations. Au sens strict, il s'agit de l'EE de la consommation apparente. L'EE moyenne, ou Empreinte écologique de la consommation par habitant, est l'Empreinte écologique de la consommation du pays divisée par sa population.

Empreinte écologique de la production primaire *«primary production Footprint»*

Contrairement à l'EE de la consommation, l'EE de la production primaire d'un pays est la somme des Empreintes écologiques de toutes les ressources récoltées, et de tous les déchets produits, dans le périmètre de la région géographique concernée. Cette EE inclut: les espaces du pays permettant la récolte des produits primaires (terres cultivées, pâturages, forêts, surfaces de pêche); les terrains bâtis (routes, usines, villes); l'espace CO₂, qui représente l'espace nécessaire pour absorber les émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion de combustibles fossiles. Autrement dit, l'EE de la forêt représente la superficie nécessaire pour produire le bois coupé pendant une année (cette superficie peut varier en fonction de la productivité de la forêt). Si un pays exporte du coton, par exemple, les ressources écologiques correspondantes ne sont pas prise en compte au niveau de l'EE de la consommation de ce pays, mais au niveau de l'Empreinte écologique de la consommation du pays qui importe les tee-shirts en coton. Elles apparaissent cependant au niveau de l'EE de la production primaire du pays exportateur de coton.

Empreinte écologique de l'électricité d'origine nucléaire *«nuclear Footprint»*

Jusqu'à l'édition 2008 des Comptes Nationaux d'Empreinte, l'électricité d'origine nucléaire était considérée comme équivalente, en termes d'EE, à l'électricité produite à partir de la combustion de fioul. A partir de l'édition 2008 des National Footprint Accounts, l'EE de l'électricité d'origine nucléaire n'est plus prise en compte dans le calcul des Empreintes écologiques des différents pays. Cela ne signifie pas que l'énergie nucléaire n'a pas d'impact sur l'environnement et ne présente pas de risque. Cela signifie seulement que ces impacts et ces risques sont difficiles à exprimer en termes de biocapacité. Parmi les problèmes soulevés par la filière nucléaire, on peut relever: les coûts cachés et les subventions déguisées; la gestion des déchets dans le futur, compte-tenu de la très longue durée de vie (plusieurs milliers d'années) de certains d'entre eux; le risque d'accident majeur au niveau des centrales nucléaires; le risque prolifération des armes contenant des matières fissibles.

Empreinte énergie «energy Footprint»

La somme de tous les espaces nécessaires pour fournir l'énergie consommée, à l'exclusion de celle incluse dans les produits alimentaires. C'est la somme des espaces CO₂, de la superficie couverte par les barrages hydroélectriques, de la forêt fournissant du bois de chauffage, des champs cultivés pour produire des carburants d'origine agricole.

Energie grise «embodied energy»

L'énergie grise est l'énergie consommée tout au long du cycle de vie d'un produit pour le fabriquer, le transporter, l'utiliser et gérer sa fin de vie. Les études d'EE utilisent souvent l'énergie grise au niveau de l'analyse des flux commerciaux de produits.

Equivalent(s) planète «Planet Equivalent(s)»

Toute EE d'une personne ou d'un pays a un équivalent planète, c'est-à-dire le nombre de planètes qu'il faudrait si tout le monde vivait comme cette personne ou comme un habitant moyen de ce pays. L'équivalent planète est le rapport de l'Empreinte écologique d'une personne à la biocapacité moyenne disponible sur Terre ou l'EE moyenne d'un habitant d'un pays à la biocapacité moyenne disponible sur Terre. En 2007, la biocapacité moyenne disponible sur Terre était de 1,8 ha_g, et l'Empreinte écologique moyenne d'un habitant de la planète de 2,7 ha_g, ce qui équivalait à 1,5 équivalent planète.

Espace CO₂ (ou Sol CO₂) «carbon uptake land»

Le besoin en biocapacité nécessaire pour séquestrer, par le biais de la photosynthèse, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) provenant de la combustion des carburants fossiles.

Facteur de conversion «conversion factor»

Un terme générique pour désigner des facteurs de conversion d'un flux de matière exprimé dans un système d'unités en un autre système d'unités. Par exemple: la combinaison de deux facteurs de conversion, les facteurs de rendement et les facteurs d'équivalence, permet de convertir des hectares en hectares globaux. Le taux d'extraction est un facteur de conversion qui permet de convertir un produit intermédiaire dans les différents produits primaires le composant.

Facteur d'équivalence «equivalence factor»

Un facteur basé sur la productivité qui permet de convertir un type de sol donné (par exemple des terres cultivées ou de la forêt) en un espace "virtuel" ayant une productivité égale à la productivité moyenne mondiale, l'hectare global. Pour les types de sol ayant une productivité supérieure à la productivité moyenne mondiale, par exemple les terres cultivées, le facteur d'équivalence est supérieur à 1. C'est pourquoi, pour convertir un hectare moyen de terres cultivées en hectares globaux il faut appliquer un facteur de

multiplication de 2,51. Dans le cas des pâturages, qui ont une productivité moyenne très inférieure, le facteur de multiplication à utiliser est 0,46. Voir aussi Tableau 47 en annexe 2.

Facteur de rendement «*yield factor*»

Un facteur qui rend compte des différences de productivité d'un type d'espace donné entre différents pays. Il existe des facteurs de rendement spécifiques pour chaque pays et chaque année. Il existe un facteur de rendement par type d'espace. Par exemple, en 2005 et en Allemagne le facteur de rendement des champs cultivés était 2,3 fois plus productif qu'un champ ayant une productivité moyenne mondiale. En multipliant le facteur de rendement, qui est de 2,3, par le facteur d'équivalence pour les champs cultivés, qui est de 2,6, il est possible de convertir des hectares de champs allemands en hectares globaux: 1 hectare de champ allemand est équivalent à 6,0 ha_g.

Hectare «*hectare*»

1/100^{ième} de km², 10 000 m² (= superficie d'un carré de 100 m de côté) ou 2 471 acres. Un hectare représente approximativement la superficie d'un terrain de football.

Hectare global (ha_g) «*global hectare (gha)*»

Une surface pondérée au niveau de la productivité et qui permet de rendre compte à la fois de la biocapacité de la Terre et des besoins en biocapacité (= l'EE). Un hectare global a une productivité égale à la productivité moyenne mondiale des surfaces bioproductives (terrestres ou en eaux) pour une année donnée. Comme les différents type d'espaces ont des productivités moyennes différentes, un hectare global de champs cultivés, par exemple, occupera une superficie réelle plus faible qu'un hectare global de prairies. Comme la bioproduktivité mondiale varie légèrement d'une année à l'autre, la valeur d'un ha_g varie aussi légèrement pendant la même période.

Hectare local «*local hectare*»

Une surface pondérée au niveau de la productivité et qui permet de rendre compte à la fois de la biocapacité d'une région et des besoins en biocapacité (= l'EE). Un hectare local a une productivité égale à la productivité moyenne régionale des surfaces bioproductives (terrestres ou en eaux) pour une année donnée.

Intensité carbone de l'électricité régional

L'intensité carbone moyenne régionale, toutes énergies primaires utilisées pour la production d'électricité confondues. L'intensité carbone de l'électricité régional, utilisée dans les CNE, édition 2010, est déterminée à partir des données du IEA. Elle est égale à 0,6 ktCO₂/GWh (Kitzes et al. 2008, p.69).

Intensité carbone de l'électricité exportée

L'intensité carbone de l'électricité exportée, toutes énergies primaires utilisées pour la production d'électricité confondues. L'intensité carbone de l'électricité exportée est un facteur variable, qui est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{\text{(Emissions de CO}_2 \text{ liées à la production d'électricité belge + incorporées dans l'électricité importée)}}{\text{(quantité d'électricité produite + quantité d'électricité importée)}}$$

L'intensité carbone de l'électricité exportée est égale à 0,3ktCO₂/GWh pour le scénario de référence.

Intensité carbone de l'énergie primaire mondiale

L'intensité carbone moyenne mondiale, toutes énergies primaires utilisées pour la production de chaleur ou d'électricité confondues. L'intensité carbone de l'énergie primaire mondiale utilisée dans les CNE, édition 2010, est déterminée à partir des données du IEA. Elle est égale à 0,06 tCO₂/GJ ou 0,216 tCO₂ / MWh_p (Kitzes et al. 2008, p.69)

Intensité carbone des produits exportés

L'intensité carbone des produits exportés, toutes énergies primaires utilisées pour leur production confondues. Il s'agit d'un facteur variable, calculé selon la formule suivante :

$$\frac{\text{(Emissions de CO}_2 \text{ liées à la production belge + incorporées dans les importations)}}{\text{(TPES (total primary energy supply) domestique + énergie incorporée dans les importations)}}$$

L'intensité carbone des produits exportés est égale à 5*10⁻⁵ tCO₂/GJ pour le scénario de référence.

Intensité énergétique

La quantité d'énergie par unité de poids d'un produit, nécessaire à la production, la fabrication, l'utilisation et l'élimination de ce produit. L'intensité énergétique est déterminée à partir de la banque de données sur l'énergie grise du Stockholm Environment Institute ou en calculant la moyenne des données d'intensité énergétique issues de nombreuses études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Intensité d'Empreinte écologique «Footprint Intensity»

Le nombre d'hectares nécessaires pour produire une quantité donnée d'une ressource donnée ou pour absorber une quantité de déchets donnée, généralement exprimé en hectares globaux par tonne. Pour calculer les Comptes Nationaux d'Empreinte, un Tableau d'intensité en EE primaire est établie pour chaque pays. Ce tableau donne le nombre d'hectares globaux de surface primaire nécessaire pour produire ou absorber une tonne de produit (par exemple: hectares globaux de champs cultivés nécessaires pour produire 1 tonne de blé, hectares globaux de forêt par tonne de dioxyde de carbone). Ici, j'utilise l'intensité d'Empreinte comme le

nombre d'hectares globaux nécessaires pour produire une quantité donnée d'électricité par an (hectares globaux nécessaire pour produire 1 TWh_e annuel).

Librairie des facteurs de conversion «*Conversion Factor Library*»

voir Tableau d'intensité en EE.

Matrice d'utilisation des sols pour la consommation «*Consumption Land Use Matrix (CLUM)*»

A partir des données des Comptes Nationaux d'Empreinte, il est possible de construire la matrice d'utilisation des sols pour la consommation. Cette matrice répartit les six Empreintes écologiques correspondant aux six principaux types d'usage du sol entre les cinq principaux postes de consommation.

Matrice d'utilisation des sols pour les produits «*Product Land Use Matrix (PLUM)*»

A partir des données des Comptes Nationaux d'Empreinte combiné avec la base de données des Nations Unies sur le commerce mondiale COMTRADE, il est possible de construire la matrice d'utilisation des sols pour les produits. Cette matrice indique pour chaque pays, pour une année donnée et par catégorie de produits un coefficient de rendement, qui exprime combien d'hectares des quatre types de sols majeures (terres cultivées, forêts, pâturages, surface de pêche) sont nécessaire pour produire 1 tonne de ce produit (D. D. Moran et al. 2009, p.1941).

Modèle Multi-Régionaux d'E/S (Entrées-Sorties) «*Multi-Region Input–Output Model (MRIO)*»

Un modèle Multi-Régionaux d'E/S permet de relier non seulement les flux monétaires entre secteurs, mais également les flux monétaires entre différents secteurs dans différentes régions et pays (Turner et al. 2007, p.40) (voir aussi Tableaux E/S).

Neutre ou négatif en termes d'Empreinte écologique «*Footprint neutral or positive*»

Activités humaines ou services qui n'ont pas d'impact sur l'EE ou un impact positif (= réduction de l'EE).

Normes d'Empreinte écologique «*Ecological Footprint Standards*»

Liste de critères portant sur les méthodes, les sources de données et la rédaction et dont l'usage est obligatoire pour réaliser des études d'EE. En matière d'EE, les normes sont définies par le Comité des Normes du Global Footprint Network, qui est composé de scientifiques et de praticiens de l'EE venus du monde entier. Les normes contribuent à rendre les études d'Empreintes écologiques plus transparentes, plus fiables et plus comparables. Lorsque des normes n'existent pas ou ne sont pas applicables, les Lignes directrices de l'EE devraient être consultées. Pour plus d'information, se reporter à www.footprintstandards.org.

Production primaire nette « *net primary production* »

L'énergie ou la biomasse accumulée dans un écosystème durant une certaine période par le biais de la photosynthèse. Il s'agit de la quantité totale d'énergie fixée biologiquement, après soustraction de la respiration des producteurs primaires (Wackernagel & Rees 1996, p.159).

Productivité « *Productivity* »

La quantité de matière biologique utilisable par l'homme qui est produite à un endroit donnée. En agriculture, la productivité est appelée rendement.

Produit fille « *daughter product* »

Produit résultant de la transformation d'un produit parent. Par exemple, la pulpe à papier est un produit fille des rondins de bois. De la même manière, le papier est un produit fille de la pulpe à papier.

Produit parent « *parent product* »

Produit transformé pour créer un produit fille. Par exemple, le blé, qui est un produit primaire, est un produit parent de la farine, qui est un produit secondaire. La farine, à son tour, est un produit parent du pain.

Produit primaire « *primary product* »

Dans les études d'EE, un produit primaire est la forme la moins transformée d'une matière biologique que les hommes récoltent à leur profit. Il y a une différence entre matière première, qui est toute la biomasse produite sur un espace donné, et le produit primaire, qui est la part de la matière première qui est récoltée et utilisée par les hommes. Par exemple, un arbre est une matière première qui, une fois débarrassé de son écorce et des ses branches, devient un produit primaire, la grume. Les produits primaires sont ensuite transformés pour produire des produits secondaires comme la pulpe de papier, le papier. Des exemples de produits primaires sont les pommes de terre, les céréales, le coton, le fourrage. Des exemples de produits secondaires sont les kWh électriques, le pain, les vêtements, la viande de bœuf ou des outils.

Produit secondaire / dérivé « *secondary product* »

Tout produit dérivé d'un produit primaire ou d'un autre produit secondaire par une séquence de transformation appliquée à un produit primaire.

Rapport énergétique

Le rapport entre l'énergie produite durant toute la durée de vie d'une centrale électrique et l'énergie nécessaire à la construction, le maintien et l'opération de cette centrale. Un rapport élevée indique par conséquent une bonne performance (Sathaye et al. 2011, p.33).

Rendement «*yield*»

La quantité de produit primaire, généralement exprimée en tonnes par an, que des hommes sont capables de produire par unité de surface d'un espace bioproductif sur terre ou en eaux.

Réserve de biodiversité «*biodiversity buffer*»

La quantité de biocapacité mise en réserve pour assurer la survie d'écosystèmes variés et pour maintenir la population d'espèces vivantes à un niveau propre à garantir leur viabilité.

Réserve écologique «*ecological reserve*»

Cf. déficit / réserve écologique.

Services écologiques

La faculté qu'ont certains éléments naturels à être utiles et utilisés par les êtres humains pour pourvoir à leurs besoins et modes de vie: les ressources naturelles de toutes sortes, mais aussi les capacités d'épuration nécessaires pour assimiler nos déchets. Ces services comprennent des services d'approvisionnement (par exemple nourriture, bois de construction), des services de régulation (par exemple régulation du climat, pollinisation des cultures), des services de soutien (par exemple photosynthèse, formation des sols) et des services culturels (p.e. expériences récréatives et esthétiques) (Pollard et al. 2010, p.10).

Soutenabilité faible

Vision sur la soutenabilité fondée sur l'hypothèse de la substituabilité du capital naturel par d'autres capitaux, notamment financier et technologique (Boutaud & Gondran 2009, p.18).

Soutenabilité forte

Vision sur la soutenabilité fondée sur l'hypothèse que le capital naturel est irremplaçable par d'autres capitaux (Boutaud & Gondran 2009, p.18).

Tableaux d'E/S (Entrées-Sorties) « *IO (Input-Output) tables* »

Les tableaux d'E/S contiennent les données utilisées dans les analyses E/S. Elles fournissent une image complète des flux de biens et de services, dans une économie et pour une année donnée. Dans sa forme la plus générale, un tableau d'E/S montre les entrées (= les achats faits par chaque secteur économique pour fabriquer ses produits, y-compris les importations) et les sorties (les biens et services produits pour la consommation intermédiaire ou finale, ou pour les exportations).

Tableau d'intensité en EE «*Footprint Intensity Table*»

L'ensemble des intensités en EE pour les produits primaires et secondaires. Ce tableau est issu des Comptes Nationaux d'Empreinte. L'intensité en EE est habituellement mesurée en ha_g par tonne de produit ou de déchets (CO₂). Le tableau d'intensité en EE est gérée par le Global Footprint Network, avec le soutien du Network's National Accounts Committee.

Taux d'extraction «*extraction rate*»

Un facteur permettant de refléter la quantité de produit parent présente dans un produit fille. Lorsqu'un produit parent est transformé, une partie peut être "perdue". Par exemple, lorsque le blé est transformé en farine blanche, le son et le germe sont perdus. Aussi, il convient, pour calculer le nombre d'hectares nécessaires pour obtenir une quantité donnée de farine, d'appliquer un coefficient de correction: c'est le taux d'extraction. Dans l'exemple de la farine blanche, le taux d'extraction est égal au rapport: tonnes de farine blanche produites / tonnes de blé utilisées pour les produire.

Temps de retour énergétique

Le temps opérationnel d'une technologie nécessaire à couvrir l'énergie nécessaire à sa construction, son opération et son déclasserment (Sathaye et al. 2011, p.33).

Terre et eaux biologiquement productive ou « bioproductives » «*biologically productive land and water*»

Surfaces terrestres ou en eaux (marines ou fluviales) qui abritent une activité de photosynthèse significative et une accumulation de biomasse utilisées par les hommes. Les surfaces non productives, ou marginalement productives (végétation très espacée) ne sont pas prises en compte. La biomasse qui n'est pas exploitée par l'homme n'est pas prise en compte non plus. La superficie biologiquement productive sur terre ou en eaux était approximativement de 11,9 milliards d'hectares en 2007.

Tonnes «*tons or tonnes*»

Tous les chiffres des Comptes Nationaux d'Empreinte sont exprimés en tonnes métriques. 1 tonne métrique équivaut à 1.000 kg.

Type de sol «*land type*»

L'espace terrestre ou en eaux biologiquement productif (environ 11,9 milliards d'hectares) peut être classé en cinq grands types d'espaces: terres cultivées; pâturages; forêts; surfaces de pêche; terrains bâtis.

Ressources bibliographiques

- Ayres, R., 2000. Commentary on the utility of the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 32(3), pp.347 - 349.
- Beerten, J. et al., 2009. Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle: A balanced appraisal. *Energy Policy*, 37(12), pp.5056 - 5068.
- van den Bergh, J. & Verbruggen, H., 1999. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the “ecological footprint”. *Ecological Economics*, 29(1), pp.61 - 72.
- Best, A. et al., 2008. *Potential of the Ecological Footprint for monitoring environmental impacts from natural resource use: Analysis of the potential of the Ecological Footprint and related assessment tools for use in the EU's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources. Report to the European Commission, DG Environment.*, Bruxelles: DG Environment.
- Bicknell, K. et al., 1998. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 27(2), pp.149 - 160.
- Boutaud, A. & Gondran, N., 2009. *L'empreinte écologique*, Paris: La Découverte.
- Boutaud, A. et al., 2010. *La Belgique et son empreinte écologique*, Bruxelles: WWF - Belgique.
- Bruers, S. & Verbeeck, B., 2010. *De berekening van de ecologische voetafdruk voor Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2010/01*, Mechelen: Ecolife vzw.
- Busby, C., 2010. *The health outcome of the Fukushima catastrophe. Initial analysis from risk model of the European Committee on Radiation Risk, ECRR*, Aberystwyth: Green Audit.
- Le Clézio, P., 2009. *Les indicateurs du développement durable et l'empreinte écologique*, Conseil économique, social et environnemental.
- Comblin, D., 2011. *L'avenir énergétique. La Belgique peut à la fois sortir du nucléaire et réduire l'effet de serre*, Liernu: Les Amis de la Terre - Belgique, APERe, Grappe, Nature et Progrès Belgique.
- CONCERE, 2010. *Belgium. National Renewable Energy Action Plan*, Bruxelles : CONCERE
- Costanza, R., 2000. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 32(3), pp.341 - 345.
- Courtonne, J.-Y. & Mathias, M., 2010. *L'Empreinte écologique du Luxembourg*, Luxembourg: Conseil Supérieur du Développement Durable (CSDD) du Grand-Duché de Luxembourg.
- CREG, 2005. *Proposition de programme indicatif des moyens de production d'électricité 2005- 2014*, Bruxelles: CREG.
- CWaPE, 2010a. *Communication concernant les modalités de calcul des coefficients d'émission de CO2 des filières de production de l'électricité verte à partir de biomasse (CD- - 10121- - CWaPE)*, Jambes : CWaPE.

- CWaPE, 2005. *Décision relative à “la définition des rendements annuels d’exploitation des installations modernes de référence, définis en application de l’article 2, 3° du décret du 12 avril 2001 relatif à l’organisation du marché régional de l’électricité - Emissions de dioxyde de carbone de la filière électrique classique, définis en application de l’article 38, § 2 du décret du 12 avril 2001 relatif à l’organisation du marché régional de l’électricité” prise en application de l’article 13 du décret du 12 avril 2001 relatif à l’organisation du marché régional de l’électricité*, Jambes : CWaPE.
- CWaPE, 2010b. *Rapport annuel spécifique sur “l’évolution du marché des certificats verts”*, Jambes: CWaPE.
- David, M. et al., 2010. *Une expertise de l’empreinte écologique*, Paris: Commissariat général au développement durable - Service de l’observation et des statistiques.
- Deutsch, L. et al., 2000. The “ecological footprint”: communicating human dependence on nature’s work. *Ecological Economics*, 32(3), pp.351 - 355.
- Devriendt, N. & Nijs, W., 2007. Forecast renewable energy and CHP till 2020 for Flanders. Proceedings of the 15th European Biomass Conference in Berlin. In 15th European Biomass Conference. Berlin: VITO.
- ECOTEC - UK, 2001. *Ecological Footprinting. Final Study.*, Bruxelles: European Parliament, Directorate General for Research.
- EDORA & ODE Vlaanderen, 2010. *National Renewable Energy Source Industry Roadmap Belgium*, Bruxelles: EDORA.
- EREC, 2010. *Re-thinking 2050. A 100% Renewable Energy Vision for the European Union*, Bruxelles : EREC.
- EurObserv’ER, 2009. Baromètre biomasse solide. *SYSTÈMES SOLAIRES le journal des énergies renouvelables*, 194.
- EurObserv’ER, 2010. Baromètre des déchets municipaux renouvelables. *SYSTÈMES SOLAIRES le journal des énergies renouvelables*, 200.
- EurObserv’ER., 2010. Baromètre biogaz. *SYSTÈMES SOLAIRES le journal des énergies renouvelables*, 200.
- Eurostat, 2010. *Energy. Yearly statistics 2008.*, Luxembourg: Eurostat. European Commission.
- Ewing, B., Moore, D., et al., 2010. *The Ecological Footprint Atlas 2010*, Oakland: Global Footprint Network.
- Ewing, B., Reed, A., et al., 2010. *Calculation methodology for the national footprint accounts, 2010 edition*, Oakland: Global Footprint Network.
- Fiala, N., 2008. Measuring sustainability: Why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. *Ecological Economics*, 67(4), pp.519 - 525.
- Flemish Environment Agency et al., 2011. *Belgium’s Greenhouse Gas Inventory (1990 - 2009). National Inventory Report submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Common Reporting Format Tables 2007.*, Bruxelles: DG Environment - Climate Change Section.

- FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie et al., 2011. *2ème Plan National d'Action en Efficacité Energétique de Belgique*, Bruxelles : FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie.
- Gagnon, L., 2008. Civilisation and energy payback. *Energy Policy*, 36(9), pp.3317 - 3322.
- GEO, List of Hydro PowerPlants - GEO. *Global Energy Observatory*. Disponible sur: <http://globalenergyobservatory.org/list.php?db=PowerPlants&type=Hydro> [Visité le 5 août 2011].
- GFN, 2010a. *At A Glance*. Disponible sur: http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/at_a_glance/ [Visité le 8 mai 2010].
- GFN, 2010b. *Ecological footprint and biocapacity, 2007. Results from National Footprint Accounts 2010 edition*. Disponible sur: http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/2010_NFA_data_tables.pdf. [Visité le 13 octobre 2010].
- GFN, 2009. *Ecological Footprint Standards 2009*. Disponible sur: www.footprintstandards.org. [Visité le 8 mai 2010].
- GFN, 2011. Glossary. *Global Footprint Network - Advancing the Science of Sustainability*. Disponible sur: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/glossary/> [Visité le 9 mai 2011].
- GIEC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy*, Hayama, Japon: Institute for Global Environmental Strategies.
- Giljum, S. et al., 2007. *Scientific assessment and evaluation of the indicator "Ecological Footprint"*, Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt).
- Huart, M., 2007. Calculez les émissions de CO2 évitées par votre chauffe-eau solaire. *Renouveau*, 22.
- IBGE, 2009. *Infos fiches-énergie. Les énergies renouvelables*, Bruxelles : IBGE.
- IEA, 2011. IEA Energy Statistics - Renewables for Belgium. *Statistics - Renewables*. Disponible sur: http://www.iea.org/stats/renewdata.asp?COUNTRY_CODE=BE [Visité le 15 juillet 2011].
- IEA, 2007. *IEA Energy Technology Essentials. Biomass for Power Generation and CHP*, Paris : IEA.
- IEA, 2010. *Key World Energy Statistics*, Paris: IEA.
- Janssen, L., 2008. *De ecologische voetafdruk van België*, Bruxelles: Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie, FOD Economie, K.M.O, Middenstand en Energie.
- Jolia-Ferrier, L. & Villy, T. red., 2006. *L'empreinte écologique*, Grenoble: Société Alpine de publications.
- Kitzes, J. & Wackernagel, M., 2009. Answers to common questions in Ecological Footprint accounting. *Ecological Indicators*, 9(4), pp.812 - 817.
- Kitzes, J., Galli, A., et al., 2009. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. *Ecological Economics*, 68(7), pp.1991 - 2007.
- Kitzes, J. et al., 2008. *Guidebook to the National Footprint Accounts: 2008 Edition*, Oakland : Global Footprint network.
- Kitzes, J., Moran, D., et al., 2009. Interpretation and application of the Ecological Footprint: A reply to Fiala (2008). *Ecological Economics*, 68(4), pp.929 - 930.

- van Kooten, C. & Bulte, E., 2000. The ecological footprint: useful science or politics? *Ecological Economics*, 32(3), pp.385 - 389.
- Ledant, J.-P., 2005. *L'empreinte écologique : un indicateur de... quoi ?*, Ottignies : Institut pour un Développement Durable.
- Lenzen, M., 2008. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49(8), pp.2178 - 2199.
- Lenzen, M. & Munksgaard, J., 2002. Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. *Renewable Energy*, 26(3), pp.339 - 362.
- Loh, J. et al., 2002. *Living Planet Report 2002*, Gland: WWF.
- Moran, D.D. et al., 2009. Trading spaces: Calculating embodied Ecological Footprints in international trade using a Product Land Use Matrix (PLUM). *Ecological Economics*, 68(7), pp.1938 - 1951.
- Pacca, S. & Horvath, A., 2002. Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the upper Colorado River Basin. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 36(14), pp.3194-3200.
- Piguet, F.P. et al., 2007. L'empreinte écologique: un indicateur ambigu. *Futuribles*, 334.
- Pollard, D. et al., 2010. *Rapport Planète Vivante 2010. Biodiversité, biocapacité et développement*, Gland: WWF.
- Rees, W., 2000. Eco-footprint analysis: merits and brickbats. *Ecological Economics*, 32(3), pp.371 - 374.
- La Revue Durable, 2008. Minidossier. L'empreinte écologique, indicateur sous pression. *La Revue Durable*, 28.
- Sathaye, J. et al., 2011. Renewable Energy in the Context of Sustainable Energy. In O. Edenhofer et al., red. *SRENN. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Final Release. Intergovernmental Panel on Climate Change - Working Group III Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stiglitz, J.E., Amartya, S. & Fitoussi, J.-P., 2009. *Report by the Commission of the Measurement of Economic Performance and Social Progress*, Paris: Commission of the Measurement of Economic Performance and Social Progress.
- Stöglehner, G., 2003. Ecological footprint – a tool for assessing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*, 11(3), pp.267 - 277.
- von Stokar, T., Steinemann, M. & Ruëgge, B., 2006. *Ecological footprint of Switzerland. Technical report.*, Berne: Federal office for spatial development.
- von Stokar, T., Steinemann, M., Ruëgge, B., et al., 2006. *Switzerland's ecological footprint. A contribution to the sustainability debate.*, Neuchâtel: Federal Statistical Office.
- Tahara, K., Kojima, T. & Inaba, A., 1997. Evaluation of CO2 payback time of power plants by LCA. *Energy Conversion and Management*, 38(Supplement 1), p.S615 - S620.

- Turner, K. et al., 2007. Examining the global environmental impact of regional consumption activities – Part 1: A technical note on combining input-output and ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 62(1), pp.37 - 44.
- Voorspools, K., Brouwers, E. & D'haeseleer, W., 2000. Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: results for the Low Countries. *Applied Energy*, 67(3), pp.307 - 330.
- Wackernagel & Rees, 1996. *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*, Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.
- Wackernagel, Lewan & Hansson, C.B., 1999. Evaluating the Use of Natural Capital with the Ecological Footprint: Applications in Sweden and Subregions. *Ambio*, 28(7), pp.604-612.
- Wackernagel, M. & Rees, W.E., 1997. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 20(1), pp.3 - 24.
- Wackernagel, M. & Silverstein, J., 2000. Big things first: focusing on the scale imperative with the ecological footprint. *Ecological Economics*, 32(3), pp.391 - 394.
- Wackernagel, M. & Yount, J.D., 1998. The Ecological Footprint: an Indicator of Progress Toward Regional Sustainability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 51, pp.511-529.
- Wackernagel, M., Monfreda, C. & Deumling, D., 2001. *The ecological footprint of nations. How much nature do they use? How much nature do they have?*, Oakland: Redefining Progress.
- Wackernagel, M. & Monfreda, C., 2004. Ecological Footprints and Energy. In C. J. Cleveland, red. *Encyclopedia of Energy*. New York: Elsevier, pp. 1 - 11.
- Wackernagel, M. et al., 2004. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 21(3), pp.271 - 278.
- Wackernagel, M., Onisto, L., et al., 1999. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 29(3), pp.375 - 390.
- Walsh, C., Moles, R. & O'Regan, B., 2010. Application of an Expanded Sequestration Estimate to the Domestic Energy Footprint of the Republic of Ireland. *Sustainability*, 2(8), pp.2555–2572.
- Walsh, C., O'Regan, B. & Moles, R., 2009. Incorporating methane into ecological footprint analysis: A case study of Ireland. *Ecological Economics*, 68(7), pp.1952 - 1962.
- Weiss, M. & Patel, M., 2007. On the Environmental Performance of Biobased Energy, Fuels, and Materials: A Comparative Analysis of Life-Cycle Assessment Studies. In M. Graziani & P. Fornasiero, red. *Renewable resources and renewable energy. A global challenge*. Boca Raton: CNC Press (Taylor & Francis Group).
- Wiedmann, T., 2009. A first empirical comparison of energy Footprints embodied in trade – MRIO versus PLUM. *Ecological Economics*, 68(7), pp.1975 - 1990.
- Wiedmann, T. & Barrett, J., 2010. A Review of the Ecological Footprint Indicator—Perceptions and Methods. *Sustainability*, 2(6), pp.1645–1693.
- Wiedmann, T. et al., 2006. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics*, 56(1), pp.28 - 48.

WWF, 2008. *Rapport planète vivante 2008*, Bruxelles: WWF - Belgique.

Annexes

1 Annexe 1 : méthode de calcul de l'EE et de la biocapacité dans les CNE par type de sol

Les terres cultivées

Sont considérées comme terres cultivées les surfaces de terre nécessaires à la production de tous les produits cultivés, en incluant les fourrages, la nourriture pour les poissons, le caoutchouc et les cultures oléagineuses. Au niveau mondial, 1,55 milliards d'hectares étaient réservés à la culture en 2007.

Les terres cultivées représentent la biocapacité la plus élevée, qui est égale à la productivité totale de toutes les terres dévouées aux cultures. Dans les calculs, l'Empreinte des terres cultivées d'une surface donnée ne peut jamais dépasser sa biocapacité. Par conséquent, l'EE ne permet pas de détecter la surexploitation des terres cultivées. Si des données sur la production durable actuelle et passée étaient disponible, le calcul de l'EE pourrait être amélioré, permettant ainsi de traquer la surexploitation des cultures (Ewing, Reed, et al. 2010, p.9).

Les CNE calculent l'EE des terres cultivées en fonction de 164 catégories de cultures. L'Empreinte de chaque catégorie est égale à la surface nécessaire pour cultiver la quantité récoltée au rendement moyen mondial (Ewing, Reed, et al. 2010, p.9).

Les forêts

L'Empreinte des forêts mesure la récolte annuelle de bois et de bois-énergie pour soutenir la production forestière. Les forêts constituaient 3,94 milliards d'hectares au niveau mondial en 2007. Par manque de données, les CNE ne font pas la distinction entre les forêts destinées à la production forestière, à la séquestration à long terme de carbone et à la conservation de la biodiversité (Ewing, Reed, et al. 2010, p.10).

Le rendement utilisé dans le calcul de l'Empreinte des forêts est l'accroissement net annuel de bois commercialisable par hectare, qui est de 1,81 m³ par hectare par année (Ewing, Reed, et al. 2010, p.10).

Les CNE calculent l'Empreinte des forêts par rapport aux quantités de production de 13 produits de bois primaires et 3 produits de bois-énergie. Les flux commerciaux incluent 30 produits de bois et 3 produits de bois-énergie (Ewing, Reed, et al. 2010, p.10).

L'Empreinte carbone ou l'espace CO₂

L'Empreinte carbone (EE_C) est la surface nécessaire pour séquestrer les émissions de CO₂. C'est le seul type de sol qui ne concerne pas un espace nécessaire à la production des ressources, mais un espace nécessaire à l'absorption des déchets : les dioxydes de carbone (CO₂). C'est également le seul type de sol pour lequel la biocapacité n'est pas calculée (Ewing, Reed, et al. 2010, p.11).

Plusieurs écosystèmes ont la capacité de séquestration à long terme de CO₂, notamment certains types de sol concernés par l'EE, comme les terres cultivées ou les pâturages. Néanmoins, comme la plus importante partie de séquestration terrestre de CO₂ se produit dans les forêts, les CNE considèrent que l'EE_C est forestière. Cela permet également d'éviter des surestimations (Ewing, Reed, et al. 2010, p.11).

L'Empreinte carbone, EE_C est calculée comme suit :

$$EE_C = (P_C * (1 - S_{océan})) / R_C * FEQ$$

Où P_C est l'émission (production) annuelle de CO₂, S_{océan} est la fraction des émissions anthropogéniques séquestrée par les océans lors d'une année donnée et R_C est le taux de séquestration annuel par hectare de forêt au rendement moyen mondial (Ewing, Reed, et al. 2010, p.11). Un hectare global en 2007 pourrait absorber le CO₂ émis par la combustion d'approximativement 1,525 litres d'essence par année (Ewing, Moore, et al. 2010, p.101)

Les terrains bâtis

L'EE des terrains bâtis est calculée sur base de la surface de terre couverte par les infrastructures humaines : les infrastructures de transport, les logements, les structures industrielles et les réservoirs des centrales hydroélectriques. En 2007, les terrains bâtis occupaient 169,59 millions d'hectares au niveau mondial. L'édition 2010 des CNE considère que les terrains bâtis occupent des terres qui, auparavant, étaient des terres cultivées. Cette hypothèse est fondée sur l'observation que les établissements humains sont généralement situés dans des régions très fertiles, qui ont le potentiel de soutenir des terres cultivées à rendement élevé. Par manque de données sur les réservoirs hydroélectriques au niveau mondial, les CNE considèrent que leur surface est proportionnelle à leur capacité de génération d'électricité (Ewing, Reed, et al. 2010, p.11).

La biocapacité et l'EE des terrains bâtis s'égalent toujours, vu que les deux quantifient la quantité de productivité biologique perdue par occupation par des infrastructures physiques. De plus, l'EE de la production des terrains bâtis est toujours égale à celle de la consommation, vu que l'empreinte des terrains bâtis incorporée dans les produits commercialisés n'est pas incluse dans les calculs, pour cause de manque de données. Par conséquent, l'EE des terrains bâtis est surestimée pour les pays exportateurs et sous-estimée pour les pays importateurs (Ewing, Reed, et al. 2010, p.11).

Les pâturages

L'ensemble des prairies utilisées pour nourrir le bétail -aussi bien les prairies cultivées que les prairies sauvages- forment les pâturages. Au niveau mondial, 3,38 milliards d'hectares étaient classifiés comme pâturages en 2007.

L'EE des pâturages est calculée en deux étapes : d'abord la demande totale en pâturage, P_{pa} , est calculée. C'est la quantité de biomasse nécessaire pour nourrir le bétail, en prélevant les besoins qui sont déjà saturés par les fourrages provenant de la culture :

$$P_{pa} = DTF - F_{mar} - F_{cult} - F_{res}$$

Où P_{pa} est la demande totale de pâturage, DTF représente la demande totale en fourrage, F_{mar} , F_{cult} et F_{res} représentent respectivement les cultures mises sur le marché normal, les cultures spécifiques pour le fourrage et les résidus des cultures (Ewing, Reed, et al. 2010, p.9).

Puis l'EE est calculée, selon la formule suivante :

$$EE_{pa} = (P_{pa} / PPN_{pa}) * FR * FEQ$$

Où EE_{pa} est l'EE pour les pâturages, PPN_{pa} est la production primaire nette¹¹² moyenne à la surface du sol pour les pâturages.

Etant donné que le rendement est égal à la production primaire nette à la surface, le dépassement n'est physiquement pas possible pour une période plus étendue. Par conséquent, l'EE des pâturages ne peut pas dépasser la biocapacité d'un pays (Ewing, Reed, et al. 2010, p.9).

Les surfaces de pêche

L'EE des surfaces de pêche est calculée selon la production primaire annuelle nécessaire pour soutenir une espèce aquatique prélevée pour la consommation. Cette demande en production primaire, DPP, est le rapport entre la masse de poisson prélevée pour la consommation et la masse de production primaire annuelle nécessaire à soutenir cette espèce, basée sur son niveau moyen dans la chaîne trophique.

¹¹²La production primaire nette est l'énergie ou la biomasse accumulée dans un écosystème durant une certaine période par le biais de la photosynthèse. Il s'agit de la quantité totale d'énergie fixée biologiquement, après soustraction de la respiration des producteurs primaires (Wackernagel & Rees 1996, p.159).

DPP est calculée comme suit :

$$DPP = TC * TP * (1 / ET)^{(NT-1)}$$

Où TC est la teneur en carbone du poids humide de la biomasse de poisson, TP est le taux de prélèvement pour les prises accessoires, ET est l'efficacité de transfert de biomasse entre deux niveaux trophiques et NT est le niveau trophique de l'espèce aquatique en question (Ewing, Reed, et al. 2010, pp.9-10).

TP est fixé à la valeur mondiale moyenne de 1,27 pour toutes les espèces de poisson. Par conséquent, chaque tonne de poissons prélevée, implique 0,27 tonnes de prises accessoires. TP est appliqué comme un coefficient constant dans l'équation, supposant ainsi que les prises accessoires ont le même niveau trophique que les espèces de poisson visées. Ces approximations sont utilisées par manque de données plus détaillées sur les prises accessoires. ET est considéré de l'ordre de 0,1 pour tous les poissons, impliquant que 10% de biomasse sont transférés entre niveaux trophiques successifs (Ewing, Reed, et al. 2010, p.10).

La biocapacité pour les surfaces de pêche est calculée en deux étapes. On commence par estimer la demande en production primaire totale qui peut être prélevée de façon durable. Puis cette demande totale est allouée aux zones du plateau continental. L'estimation pour la production primaire annuelle utilisée pour calculer le rendement marin est basée sur des estimations de prélèvements annuels durables pour 19 groupes d'espèces aquatiques. Ces quantités sont converties en équivalents en production primaire selon l'équation présentée ci-dessus. Puis la somme de ces équivalents en production primaire est considérée comme la demande en production primaire totale que les pêcheries mondiales peuvent prélever de façon durable. Par conséquent, PP_D, la demande en production primaire totale qui peut être prélevée de façon durable, est égale à :

$$PP_D = \sum (Q_{D,i} * DPP_i)$$

Où Q_{D,i} est le prélèvement durable estimé pour le groupe d'espèces i et DPP_i est la valeur de DPP correspondant au niveau trophique moyen de ce groupe d'espèces i.

Le rendement marin moyen mondial, R_M est alors égal à :

$$R_M = PP_D / A_{PC}$$

Où A_{PC} est la surface totale mondiale des zones du plateau continental (Ewing, Reed, et al. 2010, p.10).

2 Annexe 2: facteurs constants utilisés dans les CNE, édition 2010

Tableau 47: Facteurs d'équivalence par type de sol dans les CNE, édition 2010

Type de sol	Facteur d'équivalence (ha_g / ha_m)
Terres cultivées	2,51
Forêts	1,26
Pâturages	0,46
Systèmes aquatiques (marins et continentaux)	0,37
Terrains bâtis	2,51

Source : Ewing et al. 2010, p.8

Tableau 48: Facteurs constants pour le calcul de l'Empreinte carbone dans les CNE, édition 2010

Facteur	Unité	Valeur
Rapport du C au CO ₂	tC / tCO ₂	0,27
Facteur de séquestration de carbone	tC / (ha*année)	0,97
Fraction d'absorption par les océans	-	0,22
Intensité d'Empreinte du carbone	[$ha_g / (tCO_2 / \text{année})$]	0,27
Intensité carbone des énergies primaires mondiales	tCO ₂ / GJ	0,06
Approvisionnement totale en énergies primaires	PJ	2.387,40
Intensité carbone de l'électricité régional	MtCO ₂ / GWh	$5,91 \cdot 10^{-4}$

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique et sur l'année 2007

3 Annexe 3 : données de base pour le calcul de l'intensité d'EE de différents vecteurs énergétiques

Tableau 49: Coefficients d'émission de CO₂ des sources d'énergie primaire fossile

Sources d'énergies fossiles	Valeur conventionnelle* (N1 + N2) kgCO ₂ / MWh _p
Gaz Naturel	251
LPG	267
Gasoil	306
Fuel léger/moyen/lourd	310
Fuel extra-lourd	320
Charbon	385

*Les valeurs conventionnelles sont d'application pour une valorisation sur le site. En cas de transport du combustible vers le site de production, il y a lieu d'ajouter les émissions associées à ce transport (5 kgCO₂ / MWh_p pour un rayon de 200 km, 25 kgCO₂ / MWh_p dans un rayon supérieur à 200 km).

Source : CWaPE 2010, p.6

Tableau 50: Rendements annuels d'exploitation des installations de la filière électrique classique

Technologie	Rendement
Charbon subcritique	38%
Charbon supercritique	43%
Charbon supercritique avancée	45%
IGCC (cycle combiné avec gazéification intégrée)	48%
Turbines à gaz à cycle simple	35%
Turbines à gaz à cycle combiné	54%

Source : CREG 2005, pp.53-54

Tableau 51: Temps de retour énergétique, durée de vie et rapport énergétique par vecteur énergétique

Source d'énergie (Technologie)	Temps de retour énergétique (années)			Durée de vie la plus souvent citée (années)	Rapport énergétique (kWh _e / kWh _p)		
	Valeur faible	Valeur élevée	Valeur moyenne		Valeur faible	Valeur élevée	Valeur moyenne
Lignite (subcritique avancée)	1,9	3,7	2,8	30	2,0	5,4	3,7
Charbon (subcritique avancée)	0,5	3,6	2,1	30	2,5	20,0	11,3
Charbon (supercritique)	1,0	2,6	1,8	30	2,9	10,1	6,5
Gaz naturel (cycle ouvert)	1,9	3,9	2,9	30	1,9	5,6	3,8
Gaz naturel (cycle combiné)	1,2	3,6	2,4	30	2,5	8,6	5,6
Energie nucléaire (Réacteurs nucléaires à eau lourde)	2,4	2,6	2,5	40	2,9	5,6	4,3
Energie nucléaire (Réacteurs nucléaires à eau légère)	0,8	3,0	1,9	40	2,5	16,0	9,3
Soleil (Solaire photovoltaïque)	0,2	8,0	4,1	25	0,8	47,4	24,1
Soleil (Solaire thermique - CSP)	0,7	7,5	8,2	25	1,0	10,3	5,7
Chaleur géothermique (centrales géothermiques)	0,6	3,6	2,1	30	2,5	14,0	8,3
Vent (Eolien)	0,1	1,5	0,8	25	5,0	40,0	22,5
Cours d'eau (centrales hydroélectriques)	0,1	3,5	3,6	70	6,0	280,0	143,0

Source : Sathaye et al. 2011, p.34

Tableau 52: Rendements et nécessités de terre pour différentes énergies renouvelables

Vecteur d'énergie	Rendement (MJ / m ² * an)	Nécessité de terre (m ² * an / MJ)
Electricité photovoltaïque	440	0,0023
Electricité éolienne	900	0,0011
Electricité hydraulique	100	0,01
Solaire thermique	1200	0,0008
Bois extensive	7,3	0,1370
Bois intensive	18,79	0,0702
Paille comme sous-produit	4,3	0,2326
Miscanthus	25,39	0,0394
Huile de colza	5,81	0,1721
Ester méthylique de colza	4,72	0,2119
Éthanol de sucre de canne	9,3	0,1075
Éthanol de betterave sucrière	8,0	0,125
Éthanol de bois	4,6	0,2174
Éthanol du blé	4,61	0,2169
Éthanol du maïs	1,59	0,6289
Méthanol de bois	11,67	0,0857
Bio-gaz, gaz de digesteur, gaz d'enfouissement	4,98	0,2008

Source : Stöglehner 2003, p.269

Tableau 53: Production d'électricité et thermique par filière de biomasse en 2008

	Déchets municipaux	Déchets industriels	Biomasse primaire solide	Biogaz	Biocarburants liquides
Production électrique brute (TWh)	1,0	0,4	2,5	0,3	0,1
Production thermique brute (TJ)	271	216	271	221	28

Source : IEA 2011

Tableau 54: Coefficients d'émission de CO₂ des sources d'énergie primaire issue de la biomasse

Sources d'énergie issues de la biomasse	Valeur conventionnelle* (N1 + N2) kgCO ₂ / MWh _p
Déchets industriels et municipaux	0
Produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture	
• Biométhanisation (MWh _p = MWh _p biogaz)	
◦ Fumier et lisier	0
◦ Herbes (ensilage)	17
◦ Maïs	22
• Biocarburants	
◦ Huile de colza	65
◦ Biodiesel d'huile (vierge) de colza	80
Produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture et industries connexes	
• Bois cultivé à finalité énergétique	40
• Autres types de bois	
◦ Granulés de bois	30
◦ Résidus de la sylviculture (rémanents)	20
◦ Résidus des industries connexes	0

*Les valeurs conventionnelles sont d'application pour une valorisation sur le site. En cas de transport du combustible vers le site de production, il y a lieu d'ajouter les émissions associées à ce transport (5 kgCO₂ / MWh_p pour un rayon de 200 km, 25 kgCO₂ / MWh_p dans un rayon supérieur à 200 km).

Source : CWaPE 2010, p.6

Tableau 55: Exemple d'autres calculs d'EE pour la production d'un TWh_e/an

Source	Sharing Nature's Interest, Chambers, Simmons et Wackernagel, earthscan publications (Londres), 2000 (10 ³ ha _g)	Rapport Ville de York (Barrett, 1999) (10 ³ ha _g)	Wackernagel (fichier household.xls) (10 ³ ha _g)
Electricité produite par du charbon en centrales thermiques	161	82	234
Electricité produite par du charbon	198	103	304
Electricité produite par du pétrole	150	86	234
Electricité produite par du gaz naturel	94	65	176
Electricité produite par de l'énergie éolienne	6	6	/
Electricité produite par le photovoltaïque	24	24	3,3
Electricité produite par la biomasse et le bois	27 à 46	/	/
Electricité produite par l'hydroélectricité	10 à 75	/	0,11
Electricité (composé de différentes sources d'énergie)	/	150	/
Electricité d'origine nucléaire	/	/	234

Source : Jolia-Ferrier & Villy 2006, p.127

Tableau 56: Comparaison des coefficients d'émissions de CO₂ du GIEC, de la CWaPE et du GGI

Vecteur énergétique Centrales thermiques conventionnelles	Facteur d'émission selon la CWaPE (tCO ₂ /TJ)	Facteur d'émission selon le GIEC (tCO ₂ /TJ)	Facteur d'émission selon le GGI ¹¹³ (tCO ₂ /TJ)
Combustibles solides			126,97
Charbon	106,9	94,6	
Combustibles gazeux			55,95
Gaz naturel	69,7	56,1	
Gaz dérivés	?	44,4	
Combustibles liquides			76,68
Produits pétroliers	86,1	73,3	
Biomasse	11,1¹¹⁴	100,0	104,13
Autres combustibles			102,92
Déchets industriels	0,0	143,0	

Source : CWaPE 2010, p.6, GIEC 2006, p.2.16 et Flemish Environment Agency et al. 2011

4 Annexe 4 : méthode de calcul de l'EE des différents scénarios de production d'électricité

Calcul du scénario fossile

Tableau 57 résume la production et la capacité visées, actuellement installées et à mettre en place afin de réaliser le scénario fossile. Pour la génération d'électricité au gaz naturel, il faudrait une production supplémentaire de 41 TWh_e et une augmentation de la capacité de 4 GW. Pour la génération au charbon, la production devrait augmenter de 16 TWh_e et la capacité de 1 GW. Tableau 58 détaille les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaires liées à l'augmentation de la production et de la capacité.

Tableau 57: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario fossile

	Totale visée	Actuellement installée	Besoins supplémentaires
Gaz naturel			
Production	66,6 TWh _e	25,8 TWh _e	41,0 TWh _e
Capacité	10,5 GW ¹¹⁵	6,6 GW ¹¹⁶	3,9 GW
Charbon			
Production	22,2 TWh _e	6,5 TWh _e	15,7 TWh _e
Capacité	3,7 GW ¹¹⁷	2,2 GW ¹¹⁸	1,4 GW

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20 et Tableau 21

113 Greenhouse Gas Inventory. National Inventory Report submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Common Reporting Format Tables.

114 La CWaPE détermine des facteurs d'émission de CO₂ différents pour différents types de biomasse. Ici, j'ai choisi le facteur d'émission pour le bois-énergie, qui est le facteur d'émission le plus élevé de tous les types de biomasse.

115 $66,62 \text{ TWh}_e \cdot 157,73 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 10.507,97 \text{ MW}$

116 $8,42 \text{ MW} \cdot 0,75 = 6.315 \text{ MW}$

117 $22,21 \text{ TWh}_e \cdot 164,47 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 3.652,88 \text{ MW}$

118 $8,42 \text{ MW} \cdot 0,25 = 2.105 \text{ MW}$

Tableau 58: Apports d'émissions de CO₂ et surfaces nécessaires pour le scénario fossile

	Emissions de CO ₂ N3 (MtCO ₂ /an)	Emissions de CO ₂ N1 + N2 (MtCO ₂ /an)	Terrains bâtis (10 ³ ha)
Gaz Naturel	0,19 ¹¹⁹	19,02 ¹²⁰	12 ¹²¹
Charbon	0,11 ¹²²	15,66 ¹²³	5 ¹²⁴
Total	0,30	34,68	17

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20, Tableau 21 et Tableau 57

Pour calculer l'EE du scénario fossile, les émissions de CO₂ de N1+N2 sont additionnées aux émissions actuelles liées à la génération d'électricité au gaz naturel et au charbon. Le chiffre obtenu (53,02 MtCO₂/an¹²⁵) est ensuite introduit dans la feuille de calcul concernant l'Empreinte carbone de la production (iea_fossil_n, dont les données sont utilisées pour calculer fossil_efp) du fichier excel des CNE, édition 2010, sous la catégorie 'Main activity electricity plants'. Les émissions de CO₂ de N3 sont ajoutées dans la même feuille de calcul, mais sous la catégorie 'Construction'. La surface nécessaire aux infrastructures est additionnée à la surface recensée dans la feuille de calcul concernant l'Empreinte des terrains bâtis (infrastructure_efp).

Calcul du scénario nucléaire

Tableau 59 résume la production et la capacité visées, actuellement installées et à mettre en place pour produire 100% d'électricité nucléaire. Tableau 60 détaille les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaires liées à l'augmentation de la production et de la capacité.

Tableau 59: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario nucléaire

	Totale visée	Actuellement installée	Besoins supplémentaires
Energie nucléaire			
Production	88,8 TWh _e	48,2 TWh _e	41,0 TWh _e
Capacité	11,7 GW ¹²⁶	5,8 GW	5,9 GW

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20 et Tableau 21

1193.876,47 MW * 49,44 tCO₂ / MW = 191.652,68 tCO₂
12040,97 TWh_e * 464.350,00 tCO₂ / TWh_e = 19.024.419,50 tCO₂
1213.876,47 MW * 3,2 ha / MW = 12.404,70 ha
1221.442,38 MW * 70,76 tCO₂ / MW = 102.062,81 tCO₂
123 15,47 TWh_e * 1.012.550,00 tCO₂ / TWh_e = 15.664.148,50 tCO₂
124 1.442,38 MW * 3,2 ha / MW = 4.615,62 ha
12534,68 tCO₂ / an + 6,55 tCO₂ / an + 11,79 tCO₂ / an = 53,02 tCO₂ / an
12688,82 TWh_e * 131,58 MW / TWh_e = 11.686,94 MW

Tableau 60: Apports d'émissions de CO₂ et surfaces nécessaires pour le scénario nucléaire

	Emissions de CO ₂ N3 (MtCO ₂ /an)	Emissions de CO ₂ N1 + N2 (MtCO ₂ /an)	Terrains bâtis (10 ³ ha)
Nucléaire	0,32 ¹²⁷	1,58 ¹²⁸	2 ¹²⁹

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20, Tableau 21 et Tableau 59

Pour calculer l'EE du scénario nucléaire, les émissions de CO₂ de N1+N2 sont additionnées aux émissions actuelles liées à la génération d'électricité sur base d'énergie nucléaire, pour obtenir un résultat de 3,44 MtCO₂/an¹³⁰. Puis la même méthode que pour le scénario fossile est adoptée.

Calcul du scénario biomasse

Tableau 61 montre la capacité visée, installée et à mettre en place pour réaliser ce scénario. Il est difficile de déterminer exactement la production d'électricité sur base de biomasse en 2007, vu qu'il n'est pas claire si le biogaz est considéré sous la catégorie 'biomasse' ou non. Néanmoins, l'EurObserv'ER détermine la production d'électricité sur base de biomasse en 2008 à 3,18 TWh_e, biomasse solide, déchets municipaux et biogaz inclus (EurObserv'ER 2009, p.125; EurObserv'ER 2010, p.94; EurObserv'ER. 2010, p.108). Les données d'Eurostat dépassent déjà ces valeurs pour 2007. Je considérerai alors que la production issue de biomasse s'élève à 3,89 TWh_e et je n'inclurai que la biomasse et les déchets industriels.

Tableau 61: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario biomasse

	Totale visée	Actuellement installée	Besoins supplémentaires
Combustion biomasse (biomasse + déchets industriels)			
Production	88,8 TWh _e	3,9 TWh _e	84,9 TWh _e
Capacité	13,3 GW ¹³¹	8,8 GW	4,5 GW

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20 et Tableau 21

Tableau 62 montre les ressources domestiques de biomasse par filière en 2020. La production totale d'énergie primaire équivaut 2.434,69 ktep, ou 29,22 TWh_p. En supposant un rendement de 30%, la production de 84,93 TWh_e nécessite 283,10 TWh_p (IEA 2007, p.4). Il faudrait alors importer 253,88 TWh_p de biomasse, ou 21.828,60 ktep.

¹²⁷ 54,48 tCO₂ / MW * 1275.861,94 MW = 319.358,49 tCO₂
¹²⁸ 38.520,00 tCO₂ / TWh_e * 12840,95 TWh_e = 1.577.394 tCO₂
¹²⁹ 0,4 ha / MW * 1295.861,94 MW = 2.344,78 ha
¹³⁰ 6,55 tCO₂ / an + 11,79 tCO₂ / an + 13034,68 tCO₂ / an = 53,02 tCO₂ / an
¹³¹ 150,00 MW / TWh_e * 13188,82 TWh_e = 13.323,00 MW

Tableau 62: Estimation du stock belge de biomasse par filière en 2020

Filière de biomasse	Ressources domestiques (ktonnes)	Production d'énergie primaire (ktep)
Biomasse de la sylviculture	2.227,63	868,59
Approvisionnement direct de la biomasse de bois des forêts et des terres boisées pour la production énergétique.	572,30	225,10
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	1.655,33	643,49
Biomasse de l'agriculture et de la pêche	8.855,60	1030,30
Cultures agricoles et produits de pêche	3.404,70	489,80
Sous-produits et résidus	5.450,90	540,50
Biomasse des déchets	3.225,70	535,80
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	2.263,70	369,60
Fraction biodégradable des déchets industriels	868,00	155,80
Boues d'épuration	94,00	10,40
Total	14.308,93	2.434,69

Source : CONCERE 2010, p.86

Selon les chiffres reportés dans le NREAP, 1.214,62 kt de biomasse pour la production énergétique étaient importées en 2006, dont 79% d'approvisionnement indirect de bois (déchets, résidus,...), 3% de cultures agricoles ou produits de pêche, 6% de sous-produits et résidus agricoles et 12% de déchets municipaux solides (CONCERE 2010, p.86). Je supposerai que ces mêmes proportions s'appliquent plus ou moins aux importations futures. Pour des raisons de simplicité, je supposerai que les importations en biomasse de bois concernent des granulés de bois. Vu qu'il ne s'agit pas de bois cultivé uniquement pour une valorisation énergétique, je supposerai que sa production ne nécessite pas de surfaces de forêt supplémentaire. Pour les 3% de cultures agricoles et produits de pêche, je part de l'hypothèse qu'il s'agit de cultures énergétiques de maïs et pour les 6% de sous-produits et résidus agricoles qu'il s'agit d'herbes pour l'ensilage. Pour calculer la quantité de biomasse à importer, je calculerai des facteurs de conversion à partir des données présentées dans Tableau 62, en divisant à chaque fois la production d'énergie primaire par les ressources domestiques. Ces facteurs permettent ensuite de calculer le poids total de biomasse à importer, ainsi que le poids par filière. Tableau 63 résume les résultats.

Tableau 63: Estimation des importations de biomasse par filière pour le scénario biomasse

Filière de biomasse	Facteur de conversion (ktep/ktonnes)	Ressources importées (ktonnes) (%)	Production d'énergie primaire (ktep)
Biomasse de la sylviculture	-	51.095,09	19.927,09
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	0,39	51.095,09 (79%)	19.927,09
Biomasse de l'agriculture et de la pêche	-	5.820,97	659,70
Cultures agricoles et produits de pêche	0,14	1.940,32 (3%)	271,64
Sous-produits et résidus	0,10	3.880,65 (6%)	388,06
Biomasse des déchets	-	7.761,28	1.241,80
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	0,16	7.761,28 (12%)	1.241,80
Total	-	64.677,34	21.828,60

Source : CONCERE 2010, p.86 (Colonne 1 et 2 : calculs propres)

Tableau 64 détaille les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaires liées à l'augmentation de la production et de la capacité. A nouveau, je suppose que les centrales thermiques conventionnelles existantes puissent être converties pour fonctionner à la biomasse avec des investissements énergétiques et matériels négligeables. Je suppose également que des nouvelles centrales sont comparables aux centrales thermiques au charbon, tant qu'en termes de surface qu'en termes d'énergie et de matériaux nécessaires à la construction.

Tableau 64: Apports d'émissions de CO₂ et surfaces nécessaires pour le scénario biomasse

	Emissions de CO ₂ N3 (MtCO ₂ /an)	Emissions de CO ₂ N1 + N2 (MtCO ₂ /an)	Terrains bâtis (10 ³ ha)
Biomasse	0,32 ¹³²	7,91	14 ¹³³

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 65

Tableau 65 montre la méthode de calcul des émissions de CO₂ de N1+N2. Ces émissions sont ensuite additionnées aux émissions actuelles liées à la génération d'électricité sur base de biomasse, pour obtenir un résultat de 8,22 MtCO₂/an¹³⁴. Puis la même méthode que pour le scénario fossile est adoptée. Sauf qu'il faut encore ajouter les émissions de CO₂ liées à la production du bois-énergie et aux cultures agricoles, ainsi que la surface de forêt et de terres cultivées nécessaire à leur production. Finalement, il faut aussi tenir compte des émissions de CO₂ incorporées dans la biomasse importée, ainsi que des terres cultivées et des forêts étrangères nécessaire à la production de la biomasse importée.

1324.481,00 MW * 70,76 tCO₂/MW = 317.075,56 tCO₂

1334.481,00 MW * 3,2 ha/MW = 14.339,20 ha

1347,91 MtCO₂/an + 0,31 MtCO₂/an + 0,00 MtCO₂/an = 8,22 MtCO₂/an

Tableau 65: Emissions de CO₂ (N1+N2) pour le scénario biomasse.

Filière de biomasse	Energie primaire (domestique + importations) (TWh _p)	Coefficient d'émission de CO ₂ (MtCO ₂ /TWh _p)	Emissions de CO ₂ (MtCO ₂)
Biomasse de la sylviculture			
Approvisionnement direct de la biomasse de bois des forêts et des terres boisées pour la production énergétique.	2,70	0,040	0,11
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	246,85	0,030	7,41
Biomasse de l'agriculture et de la pêche			
Cultures agricoles et produits de pêche	9,14	0,022	0,20
Sous-produits et résidus	11,14	0,017	0,19
Biomasse des déchets			
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	19,34	0	0,00
Fraction biodégradable des déchets industriels	1,87	0	0,00
Boues d'épuration	0,12	0	0,00
Total	291,16¹³⁵	-	7,91

Source : Calculs propres sur base des données de la CWaPE 2010, p.6 et Tableau 62 et Tableau 63

Normalement, il faudrait également calculer les émissions de CO₂ liées à la production du bois-énergie et aux cultures énergétiques. Sur base des facteurs d'énergie incorporée et les facteurs d'émissions de CO₂ utilisés par les CNE pour le calcul des émissions de CO₂ incorporée dans les exportations et les importations, il s'agirait de 0,34 MtCO₂¹³⁶ pour le bois-énergie et 0,82 MtCO₂¹³⁷ pour les cultures agricoles (en supposant qu'il s'agisse du maïs pour les cultures agricoles). Ces chiffres devraient ensuite être ajoutés à la feuille de calcul concernant l'Empreinte carbone de la production (iea_fossil_n, dont les données sont reprises pour les calculs de fossil_efp) du fichier excel des CNE, édition 2010, sous les catégories 'Wood and Wood Products' et 'Agriculture'. Ici, j'ai néanmoins opté à ne pas ajouter ces chiffres, vu que j'ai calculé les émissions de CO₂ liée à la production d'énergie sur base des coefficients d'émission de CO₂ de la CWaPE, qui contiennent déjà N1+N2. Ainsi j'évite des problèmes de double comptage.

Dans les CNE, les surfaces de terres cultivées et de forêt sont calculées sur base de la quantité de produits récoltés. Ainsi, j'ajouterai le poids du bois-énergie à la feuille de calcul concernant la production forestière (forestat_n, dont les données sont reprises pour les calculs de forest_efp) sous la catégorie 'Wood fuel'. J'ajouterai également le poids des produits agricoles à la feuille de calcul concernant la production agricole (prodstat_crop_n, dont les données sont reprises pour les calculs de crop_efp et de crop_yield_n). Je supposerai qu'il s'agisse d'une production de maïs et l'ajouterai par conséquent sous la rubrique 'Maize'. Le rendement des terres cultivées est calculé à partir des données sur la production, comparée à la surface de production nécessaire. Pour éviter que le facteur de rendement augmente, il faut donc également adapter la

¹³⁵Ce chiffre diffère du 283,10 TWh_p mentionnée précédemment. La différence est due aux conversions entre unités et arrondissements.

¹³⁶572.300 t * 0,001 TJ / t * 0,06 tCO₂ / GJ = 34.338,00 tCO₂ = 0,34 MtCO₂

¹³⁷3.404.700 t * 4 GJ / t * 0,06 tCO₂ / GJ = 817.128,00 tCO₂ = 0,82 MtCO₂

surface nécessaire à la production. Je supposerai que la surface de terres cultivées augmente de façon équivalente à l'augmentation de production.

Pour le maïs importé, le poids est ajouté sous la même rubrique, mais dans la feuille de calcul qui concerne les importations agricoles (tradedstat_n, dont les données sont reprises pour le calcul de crop_efi). Tous les autres produits de biomasse concernent des déchets, des sous-produits ou des résidus, dont je suppose qu'il ne faille pas de terre ou de forêt supplémentaire pour les produire.

Finalement, les émissions de CO₂ incorporées dans les produits importés sont également calculées à partir de la quantité de produits, selon la méthode des CNE. J'ajouterai donc le poids des produits importés dans la feuille de calcul concernant l'Empreinte carbone des importations (comtrade_n, dont les données sont reprises pour les calculs de carbon_efi), sous les rubriques 'Fuel Wood and Wood Waste' et 'Maize'. Pour les déchets municipaux solides et les sous-produits et résidus agricoles, il n'y a pas de catégorie qui est vraiment appropriée. Faute de meilleure solution, je les ai ajouté à la catégorie 'Food Wastes & prepared animal feed'. Ici, il y a un risque de double comptage, vu que j'ai calculé les émissions de CO₂ liées à la génération d'électricité sur base des coefficients d'émission de la CWaPE, qui contiennent déjà N1+N2. Vu qu'il s'agit de commerce international, j'ai choisi d'inclure quand-même ces impacts, pour tenir compte des émissions de CO₂ liées au transport international.

Calcul du scénario ER

Tableau 66 synthétise le potentiel technique par vecteur. Comblin estime que la géothermie a également un potentiel de 6,00 TWh_e. Vu que la géothermie n'est actuellement pas du tout développée en Belgique et n'a pas été considérée dans les analyses précédentes, je l'ai également exclue de cette analyse.

Tableau 66: Projections du potentiel technique électrique par vecteur d'énergie renouvelable

Vecteur énergétique	Potentiel technique (TWh_e)
Eolien offshore	24
Eolien intérieur	16
Solaire PV	10
Hydroélectricité	0,6
Total	50,6

Source : Comblin 2011, p.64

Tableau 67 détaille la production et la capacité visée, installée et à mettre en place. Il est surprenant de constater que la production hydroélectrique (selon Eurostat) dépasse déjà le potentiel technique estimé par Comblin. Je supposerai alors que la production hydroélectrique actuelle soit le potentiel maximal à atteindre et qu'il n'y ait donc plus de croissance possible. La production totale des ER en Belgique est alors 52 TWh_e. Les 37 TWh_e restants seront donc soit produits à partir de biomasse, soit importés sous forme d'électricité. Je supposerai que la capacité installée en centrales thermiques conventionnelles soit largement suffisante

pour la combustion de la biomasse et que ces centrales peuvent être converties avec un investissement énergétique et matériel négligeable. C'est alors surtout dans le domaine de l'éolienne et du solaire PV qu'une augmentation importante s'impose tant en termes de capacité qu'en termes de production.

Tableau 67: Production et capacité actuelles et nécessaires pour le scénario ER

Vecteur énergétique	Totale visée	Actuellement installée	Besoins supplémentaires
Hydraulique			
Production	0,60 TWh _e	1,68 TWh _e	0 TWh _e
Capacité	153,85 MW ¹³⁸	1.417 MW	0 MW
Solaire PV			
Production	10,00 TWh _e	0,006 TWh _e	9,994 TWh _e
Capacité	8.333,30 MW ¹³⁹	20 MW	8.313,3 MW
Eolien			
Production	40,00 TWh _e	0,49 TWh _e	39,51 TWh _e
Capacité	19.372,80 MW ¹⁴⁰	276 MW	19.096,80 MW
Biomasse			
Production	37,14 TWh _e	3,89 TWh _e	33,25 TWh _e
Capacité	5.571,00 MW ¹⁴¹	8.842,00 MW	0 MW

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 20 et Tableau 66

Le scénario ERbiomasse

La production totale d'énergie primaire équivaut 29 TWh_p. En supposant un rendement de 30%, la production de 37 TWh_e nécessiterait 124 TWh_p (IEA 2007, p.4). Il faudrait alors importer 95 TWh_p de biomasse, ou $8 \cdot 10^3$ ktep.

Selon les chiffres reportés dans le NREAP, $1 \cdot 10^3$ kt de biomasse pour la production énergétique étaient importées en 2006, dont 79% d'approvisionnement indirect de bois (déchets, résidus,...), 3% de cultures agricoles ou produits de pêche, 6% de sous-produits et résidus agricoles et 12% de déchets municipaux solides (CONCERE 2010, p.86). Je supposerai que ces mêmes proportions s'appliquent plus ou moins aux importations futures. Pour des raisons de simplicité, je supposerai à nouveau que les importations en biomasse de bois concernent des granulés de bois. Vu qu'il ne s'agit pas de bois cultivé uniquement pour une valorisation énergétique, je supposerai que sa production ne nécessite pas de surfaces de forêt supplémentaire. Pour les 3% de cultures agricoles et produits de pêche, je part de l'hypothèse qu'il s'agit de cultures énergétiques de maïs et pour les 6% de sous-produits et résidus agricoles qu'il s'agit d'herbes pour l'ensilage. Tableau 68 résume l'ensemble des importations.

$1380,60 \text{ TWh}_e \cdot 256,41 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 153,85 \text{ MW}$
 $13910,00 \text{ TWh}_e \cdot 833,33 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 8.333,30 \text{ MW}$
 $14040,00 \text{ TWh}_e \cdot 484,32 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 19.372,80 \text{ MW}$
 $14137,14 \text{ TWh}_e \cdot 150,00 \text{ MW} / \text{TWh}_e = 5.571,00 \text{ MW}$

Tableau 68: Estimation des importations de biomasse pour le scénario ER

Filière de biomasse	Facteur de conversion (ktep/ktonnes)	Ressources importées (ktonnes) (%)	Production d'énergie primaire (ktep)
Biomasse de la sylviculture	-	19.034,88	7.423,60
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	0,39	19.034,88 (79%)	7.423,60
Biomasse de l'agriculture et de la pêche	-	2.168,53	245,77
Cultures agricoles et produits de pêche	0,14	722,84 (3%)	101,20
Sous-produits et résidus	0,10	1.445,69 (6%)	144,57
Biomasse des déchets	-	2.891,37	462,62
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	0,16	2.891,37 (12%)	462,62
Total	-	24.094,79	8.131,99

Source : Calculs propres sur base des données du CONCERE 2010, p.86 et Tableau 63

Tableau 69 détaille les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaires liées à l'augmentation de la production et de la capacité. Tableau 70 montre la façon dont les émissions liées à N1+N2 sont calculées pour la biomasse. Pour calculer l'EE, les émissions de CO₂ de N1+N2 sont additionnées aux émissions actuelles liées à la génération d'électricité sur base des énergies renouvelables (i.c. seulement les émissions de biomasse), pour obtenir un résultat de 3,62 MtCO₂/an¹⁴². Puis la même méthode que pour le scénario biomasse est adopté.

Tableau 69: Apports d'émissions de CO₂ et surfaces nécessaires pour le scénario ER

	Emissions de CO ₂ N3 (MtCO ₂ /an)	Emissions de CO ₂ N1 + N2 (MtCO ₂ /an)	Terrains bâtis (ha)
Hydraulique	0,00	0,00	0,00
Solaire PV	0,46 ¹⁴³	0,00	83.133,00 ¹⁴⁴
Eolienne	0,18 ¹⁴⁵	0,00	32.655,53 ¹⁴⁶
Biomasse	0,00	3,31	0,00
Total	0,64	3,31	115.788,53

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 67 (calculs propres)

¹⁴² 1423,31 MtCO₂/ an + 0,31 MtCO₂/ an + 0,00 MtCO₂ = 3,62 MtCO₂/ an
¹⁴³ 1438.313,30 MW * 54,93 tCO₂/ MW = 456.649,57 tCO₂
¹⁴⁴ 1448.313,30 MW * 10 ha / MW
¹⁴⁵ 14519.096,80 MW * 9,42 tCO₂/ MW = 179.891,86 tCO₂
¹⁴⁶ 14619.096,80 MW * 1,71 ha / MW

Tableau 70: Emissions de CO₂ (N1+N2) liées à la combustion de la biomasse pour le scénario ER

Filière de biomasse	Energie primaire (domestique + importations) (TWh _p)	Coefficient d'émission de CO ₂ (MtCO ₂ /TWh _p)	Emissions de CO ₂ (MtCO ₂)
Biomasse de la sylviculture			
Approvisionnement direct de la biomasse de bois des forêts et des terres boisées pour la production énergétique.	2,70	0,040	0,11
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	96,81	0,030	2,90
Biomasse de l'agriculture et de la pêche			
Cultures agricoles et produits de pêche	7,06	0,022	0,16
Sous-produits et résidus	8,22	0,017	0,14
Biomasse des déchets			
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	9,99	0	0,00
Fraction biodégradable des déchets industriels	1,87	0	0,00
Boues d'épuration	0,12	0	0,00
Total	126,77¹⁴⁷	-	3,31

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 62, Tableau 68 et CWaPE 2010, p.6

Scénario ERélectricité

Les surfaces et les émissions de CO₂ liées aux infrastructures sont synthétisées en Tableau 69.

Les 37,14 TWh_e restants sont importés sous forme d'électricité. Selon la méthode des CNE, les émissions de CO₂ incorporée dans l'électricité importée sont calculées à partir d'un facteur constant, l'intensité carbone de l'électricité régionale, qui équivaut 0,0006 MtCO₂ / GWh_e.

Pour calculer l'EE pour ce scénario, la même méthode que pour le scénario fossile est utilisé. Les émissions liées à N1 et N2 sont égales à 0,00. La quantité d'électricité importée est introduit dans la feuille de calcul qui concerne le commerce d'électricité (electricity_trade).

Calcul des scénarios URE

Tableau 72 résume les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaire par vecteur énergétique pour le scénario de référence. Par scénario URE, je calculerai les différences en termes des émissions et des surfaces avec le scénario de référence. Tableau 71 montre la capacité par unité de production. J'ai recalculé ce facteur sur base des données d'Eurostat. Les facteurs obtenus ne diffèrent pas énormément des facteurs calculés précédemment sur base d'autres données. Néanmoins, je voulais éviter d'obtenir des différences par rapport au scénario de référence qui sont dues aux facteurs de conversion plutôt qu'aux différences entre scénarios.

¹⁴⁷Ce chiffre diffère du 123,8 TWh_p mentionnée précédemment. La différence est due aux conversions entre unités et arrondissements.

Tableau 71: Capacités installées et nécessaires par TWh_e pour le scénario de référence

Vecteur énergétique	Production d'électricité (TWh _e /an)	Capacité installée (GW)	Capacité par unité de production électrique (GW/TWh _e)
Centrales thermiques conventionnels	38	9	
Charbon	6	2	0,2
Gaz naturel	25	6	0,2
Produits pétroliers	0,8	0,2	0,2
Gaz dérivés	2	0,4	0,2
Biomasse	3	0,7	0,2
Déchets industriels	0,8	0,2	0,2
Centrales nucléaires	48	6	0,1
Installations éoliennes	0,5	0,3	0,6
Centrales hydroélectriques	2	1	0,8
Installations solaires PV	0,006	0,02	3,3
Total	89	16	

Source : Eurostat 2010, pp.26-27 et pp.34-35 (colonne 2 et 3 : calculs propres).

Tableau 72: Emissions de CO₂ et surfaces nécessaires pour le scénario de référence

Vecteur énergétique	Emissions de CO ₂ liées à N3 (MtCO ₂)	Emissions de CO ₂ liées à N1+N2 (MtCO ₂)	Surfaces nécessaires (10 ³ ha)
Centrales thermiques conventionnels			
Charbon	0,11	6,55	5
Gaz naturel	0,29	11,79	19
Produits pétroliers	0,01	0,22	0,6
Gaz dérivés	0,02	0,86	1
Biomasse	0,05	0,31	2
Déchets industriels	0,01	0,00	0,6
Centrales nucléaires	0,32	1,86	2
Installations éoliennes	0,003	0,00	0,5
Centrales hydroélectriques	0,01	0,00	0,1¹⁴⁸
Installations solaires PV	0,0003	0,00	0,06
Total	0,82	21,60	31

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 71

Tableau 73 jusqu'à Tableau 76 synthétisent la production d'électricité, la capacité nécessaire, les émissions de CO₂ et les surfaces nécessaires pour chaque scénario URE.

1481.683 Gwh * 0,077 Gwh(ha_m*an) = 129,59 ha

Tableau 73: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URE_{stab.-norm.}

Vecteur énergétique	Production d'électricité (TWh/an)	Capacité nécessaire (GW)	Emissions de CO ₂ liées à N3 (MtCO ₂)	Emissions de CO ₂ liées à N1+N2 (MtCO ₂)	Surfaces nécessaires (10 ³ ha)
Centrales thermiques conventionnels					
Charbon	24	1	0,10	6,10	4
Gaz naturel	36	5	0,27	10,96	17
Produits pétroliers	6	0,2	0,01	0,21	0,6
Gaz dérivés	2	0,4	0,02	0,80	1
Biomasse	3	0,7	0,05	0,29	2
Déchets industriels	0,7	0,2	0,01	0,00	0,5
Centrales nucléaires	45	5	0,30	1,73	2
Installations éoliennes	0,5	0,3	0,002	0,00	0,4
Centrales hydroélectriques	2	1	0,008	0,00	0,1
Installations solaires PV	0,005	0,005	0,0003	0,00	0,06
Total	83		0,76	20,08	29

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 71

Tableau 74: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URE_{réd.-norm.}

Vecteur énergétique	Production d'électricité (TWh/an)	Capacité nécessaire (GW)	Emissions de CO ₂ liées à N3 (MtCO ₂)	Emissions de CO ₂ liées à N1+N2 (MtCO ₂)	Surfaces nécessaires (10 ³ ha)
Centrales thermiques conventionnels					
Charbon	5	1	0,08	4,98	4
Gaz naturel	19	4	0,22	8,96	14
Produits pétroliers	0,6	0,1	0,01	0,17	0,5
Gaz dérivés	1	0,3	0,02	0,65	1
Biomasse	2	0,5	0,04	0,24	2
Déchets industriels	0,6	0,1	0,01	0,00	0,4
Centrales nucléaires	37	4	0,24	1,41	2
Installations éoliennes	0,4	0,2	0,002	0,00	0,4
Centrales hydroélectriques	1	1	0,01	0,00	-
Installations solaires PV	0,005	0,005	0,0003	0,00	0,05
Total	68		0,62	16,41	24

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 71

Tableau 75: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URE_{stab.-ER}

Vecteur énergétique	Production d'électricité (TWh _a /an)	Capacité nécessaire (GW)	Emissions de CO ₂ liées à N3 (MtCO ₂)	Emissions de CO ₂ liées à N1+N2 (MtCO ₂)	Surfaces nécessaires (10 ³ ha)
Centrales thermiques conventionnels					
Charbon	6	1	0,10	6,06	4
Gaz naturel	23	5	0,27	10,90	17
Produits pétroliers	0,8	0,2	0,01	0,21	0,6
Gaz dérivés	2	0,4	0,02	0,80	1
Biomasse	3	0,7	0,05	0,31	2
Déchets industriels	0,8	0,2	0,01	0,00	0,6
Centrales nucléaires	45	5	0,29	1,72	2
Installations éoliennes	0,5	0,3	0,003	0,00	0,5
Centrales hydroélectriques	2	1	0,009	0,00	-
Installations solaires PV	0,006	0,006	0,0003	0,00	0,06
Total	83		0,76	20,00	29

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 71

Tableau 76: Productions, capacités nécessaires et impacts pour le scénario URE_{réd.-ER}

Vecteur énergétique	Production d'électricité (TWh _a /an)	Capacité nécessaire (GW)	Emissions de CO ₂ liées à N3 (MtCO ₂)	Emissions de CO ₂ liées à N1+N2 (MtCO ₂)	Surfaces nécessaires (10 ³ ha)
Centrales thermiques conventionnels					
Charbon	5	1	0,08	4,87	4
Gaz naturel	19	4	0,21	8,75	14
Produits pétroliers	0,6	0,1	0,01	0,17	0,4
Gaz dérivés	1	0,3	0,02	0,64	1
Biomasse	3	0,7	0,05	0,31	2
Déchets industriels	0,8	0,2	0,01	0,00	0,6
Centrales nucléaires	36	4	0,24	1,38	2
Installations éoliennes	0,5	0,3	0,003	0,00	0,5
Centrales hydroélectriques	2	1	0,009	0,00	-
Installations solaires PV	0,006	0,006	0,0003	0,00	0,06
Total	68		0,63	16,11	24

Source : Calculs propres sur base des données de Tableau 21 et Tableau 71

Pour calculer les terres cultivées et les forêts nécessaires à la production de biomasse pour les différents scénarios, je me baserai à nouveau sur les prévisions pour 2020 du NREAP (voir Tableau 77). Je supposerai que les proportions entre différents filières s'appliquent également à la production actuelle. Pour le scénario de référence, il faut une production de 3,98 TWh_e, soit 1.114,59 ktep¹⁴⁹ d'énergie primaire. Pour le scénario URE_{stab.-norm.} et URE_{réd.-norm.} il s'agit respectivement de 1.036,57 ktep et 847,09 ktep. Selon les estimations, toute l'énergie primaire nécessaire est disponible en ressources domestiques. Pour les scénarios URE_{stab.-ER} et URE_{réd.-ER}, la capacité maximale de biomasse du scénario de référence est retenue, impliquant la même production de bois-énergie et de terres cultivées que le scénario de référence.

¹⁴⁹ $(3,98 \text{ TWh}_e / 0,30 \text{ TWh}_e(\text{TWh}_p)^{-1}) * 85,89 \text{ ktep}(\text{TWh})^{-1} = 1.114,59$

Tableau 77: Estimation de la production de biomasse domestique pour les différents scénarios URE

Scénario	Scénario de référence		Scénario URE _{stab.-norm.}		Scénario URE _{réd.-norm.}	
Filière de biomasse	Ressources (ktonnes)	Production d'énergie primaire (ktep)	Ressources (ktonnes)	Production d'énergie primaire (ktep)	Ressources (ktonnes)	Production d'énergie primaire (ktep)
Biomasse de la sylviculture						
Approvisionnement direct de la biomasse de bois des forêts et des terres boisées pour la production énergétique.	113,34	44,58	105,41	41,46	86,14	33,88
Approvisionnement indirect de la biomasse de bois pour la production énergétique.	331,69	128,94	308,74	119,92	252,09	98,00
Biomasse de l'agriculture et de la pêche						
Cultures agricoles et produits de pêche	1.843,51	265,21	1.714,74	246,64	1.401,07	201,56
Sous-produits et résidus	4.282,01	424,60	3.982,27	394,87	3.254,33	322,69
Biomasse des déchets						
Fraction biodégradable des déchets municipaux solides	1.079,97	176,33	1.004,38	163,99	820,78	134,01
Fraction biodégradable des déchets industriels	376,69	67,61	350,32	62,88	286,28	51,39
Boues d'épuration	66,18	7,32	61,55	6,81	50,30	5,56
Total	8.093,39	1.114,59	7.526,86	1.036,57	6.150,98	847,09

Source : Calculs propres sur base des données du CONCERE 2010, p.86

Pour calculer l'EE de chaque scénario, la différence entre le scénario et le scénario de référence est soustrait dans les feuilles de calculs appropriées. Pour les émissions de CO₂ liées à N3 et au N1+N2, la différence est soustraite des données dans la feuille de calcul concernant la production de l'Empreinte carbone (iea_fossil_n, dont les données sont reprises pour le calcul de carbon_efp), respectivement sous la catégorie 'Construction' et sous la catégorie 'Main Activity Electricity Plants'. La différence de surface est soustraite des données dans la feuille de calcul concernant les terrains bâtis (infrastructure_efp). Pour tenir compte de la différence de surface des centrales hydrauliques, la différence en production d'électricité est soustrait dans la feuille de calcul concernant l'hydroélectricité (hydro_efp). Finalement les quantités de production de bois-énergie et de produits agricoles sont soustraites des feuilles de calcul concernant la production des forêts et des terres cultivées (forestat_n, dont les données sont repris pour le calcul de forest_efp et prodstat_crop_n, dont les données sont repris pour le calcul de crop_efp). Je supposerai à nouveau qu'il s'agisse d'une production de maïs. A nouveau, j'adapterai également la surface des terres cultivées, pour éviter que le facteur de rendement change.

La diminution de production d'électricité, entraîne une diminution des émissions de CO₂ liées à la production

belge. Cette diminution des émissions fait également diminuer l'intensité carbone des produits exportés, sans qu'il y ait un changement du bouquet électrique réel. Afin d'éviter ce changement, le TPES domestique est recalculé pour chaque scénario. Ensuite, la différence avec le scénario de référence est soustraite du TPES domestique totale dans la feuille de calcul appropriée (carbon_intensity_n). Le calcul du TPES de la production d'électricité domestique est élaboré par énergie primaire sur base des rendements des technologies en question. Le rendement de l'énergie éolienne, de l'hydroélectricité et de l'énergie solaire photovoltaïque est supposé être 1, selon les conventions de l'IEA (IEA 2010, p.60)

Tableau 78 montre le TPES par scénario URE. La différence en TPES entre les scénarios avec une stabilisation et une réduction proportionnelle des énergies primaires et ceux qui favorisent les ER, est dû au fait que le rendement des technologies des ER est supposé d'être 1, tandis que les rendements des centrales thermiques et nucléaires sont beaucoup plus bas. Un rendement bas implique une consommation d'énergie primaire beaucoup plus importante par unité d'électricité produite.

Tableau 78: TPES pour la production électrique domestique par scénario URE

Scénario	TPES pour la production électrique domestique (10 ⁶ GJ)
Scénario de référence	831
Scénario UREstab.-norm.	773
Scénario UREred.-norm.	632
Scénario UREstab.-ER	773
Scénario UREred.-ER	631

Source : calculs propres

Pour éviter un changement au niveau de l'intensité carbone de l'électricité exporté, qui n'est pas dû à un changement du bouquet électrique, la production d'électricité est également adaptée dans le feuille de calcul sur les échanges d'électricité (electricity_trade).

Tableau 79 montre l'Empreinte carbone selon l'hypothèse d'une production d'électricité sans aucune émissions de CO₂.

Tableau 79: EE_c pour une production électrique à zéro émissions de CO₂ en Belgique en 2007

	EE _p (10 ⁶ ha _g)	EE _i (10 ⁶ ha _g)	EE _e (10 ⁶ ha _g)	EE _{cons} (10 ⁶ ha _g)
Emissions des combustibles	23,6	82,5	73,8	32,2
Commerce international en électricité	-	2,6	0,2	2,3
Combustibles de soute	7,3	-	-	7,3
Total	30,9	85,1	74,1	41,9

Source : CNE, édition 2010, portant sur la Belgique pour l'année 2007, recalculée selon une production d'électricité à zéro émission de CO₂

5 Annexe 5 : recherche bibliographique effectuée

Pour la première étape de cette recherche, je me suis basée sur trois sources : premièrement, j'ai consulté le site web du Global Footprint Network. Ce site web fournit de nombreuses références très intéressantes et mentionne les recherches et les critiques les plus pertinentes concernant l'Empreinte écologique. Il regroupe également toutes les informations concernant la méthode de calcul standardisée des Comptes Nationaux d'Empreinte et un glossaire. En seconde lieu, j'ai consulté le catalogue des bibliothèques de l'ULB. Néanmoins, ce catalogue contient très peu d'informations sur l'Empreinte écologique : il n'y a que deux mémoires et deux livres. Via les bases de données 'Francis' et 'Web of sciences' de nombreux articles et références sont par contre disponibles. La plus grande partie de la littérature sur l'Empreinte écologique est en Anglais. J'ai utilisé le mot clé 'Wackernagel', afin de trouver les livres et les articles de base sur l'Empreinte écologique. Ensuite, j'ai utilisé les mots clé 'Ecological footprint' et 'Empreinte écologique'. J'ai sélectionné les articles les plus pertinents sur base des titres. Ensuite j'ai étudié leurs références bibliographiques et sélectionné les articles qui étaient souvent cités, afin de sélectionner les articles les plus pertinents, parmi les centaines d'articles. Finalement, le site web du WWF et les rapports annuels 'Planète Vivante' étaient une source d'information précieuse en ce qui concerne l'état actuel et l'évolution de l'Empreinte écologique et de la biocapacité.

Trois différentes pistes de recherche m'ont permis de trouver les données statistiques et les études ACV nécessaires pour la deuxième et la troisième étape de ma recherche. D'un côté, j'ai utilisé le dernier rapport du GIEC. Ce rapport contient beaucoup d'informations, ainsi que de nombreuses références, que j'ai pu retrouver par le biais de la base de données 'Web of Science'. En seconde lieu, j'ai utilisé la base de données de l'APERRE afin de trouver des informations pertinentes et actuelles sur la production d'électricité issue des différentes énergies primaires en Belgique. Finalement, j'ai utilisé les données disponibles via les sites web des instances officielles, tels qu'Eurostat, l'International Energy Agency, le GIEC, la Commission Européenne, la CWaPE, le VITO, la CREG, l'IBGE, l'EDORA, l'EREC, le WWF...