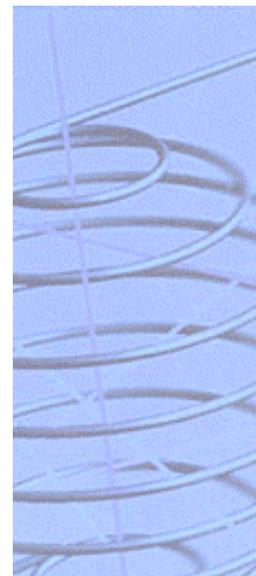


Contributions du bois-énergie au développement durable en Belgique

Rapport final

GEB-UCL – CRA – CEE-UCL – UIA – LEGC-UCL



Changement global et développement durable
Sous-programme 2 : appui scientifique à la politique belge

Global change en duurzame ontwikkeling
Deelprogramma 2: wetenschappelijke ondersteuning van het beleid in België

N° CG/DD/251, CG/DD/252, CG/DD/253, CG/DD/254 & CG/DD/255

Développement durable | Duurzame ontwikkeling



FEDERALE DIENSTEN VOOR
WETENSCHAPPELIJKE, TECHNISCHE
EN CULTURELE AANGELEGHEDEN
Wetenschapsstraat 8 ■ B-1000 BRUSSEL
Tel. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12
URL : www.belspo.be

SERVICES FEDERAUX DES
AFFAIRES SCIENTIFIQUES,
TECHNIQUES ET CULTURELLES

rue de la Science 8 ■ B-1000 BRUXELLES
Tél. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12
URL : www.belspo.be



D/2001/1191/36
Uitgeven in 2001 voor de
Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden
Publié en 2001 par les
Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles

Voor meer informatie / Pour d'autres renseignements :

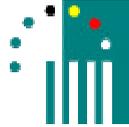
Madame A. Fierens
DWTC/SSTC
Wetenschapstraat 8 rue de la science
Brussel 1000 Bruxelles
Tel. : +32-2-238.36.60
Fax. : +32-2-230.59.12
E-mail : fier @belspo.be
Internet : <http://www.belspo.be>

Noch de Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden (DWTC), noch eenieder die handelt in de naam van de DWTC is verantwoordelijk voor het gebruik dat van de volgende informatie zou worden gemaakt.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën of enige andere manier zonder de aanduiding van de referentie.

Les services fédéraux des Affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC) ainsi que toute personne agissant en leur nom ne peuvent être tenus pour responsables de l'éventuelle utilisation qui serait faite des informations qui suivent.

Cette publication ne peut ni être reproduite, même partiellement, ni stockée dans un système de récupération ni transmise sous aucune forme ou par aucun moyens électronique, mécanique, photocopies, enregistrement ou autres sans y avoir indiqué la référence.



WOODSUSTAIN

Contributions du bois-énergie au développement durable en Belgique

Rapport final Juin 2001

Ir. I. Sintzoff & Prof. J. Martin
Groupe Energie Biomasse
Université catholique de Louvain

Ir. J.F. Menu & M. Temmerman
Station de Génie Rural
Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux

J. Thiry & Prof. D. Tyteca
Centre Entreprise Environnement
Université catholique de Louvain

W. de Raedt, Dr. E. Casella & Prof. R. Ceulemans
Research group of Plant and Vegetation Ecology
Universiteit Instelling Antwerpen

Ir. X. Dubuisson, Ir. J.M. Jossart & Prof. Ledent
Laboratoire d'Ecologie des Grandes Cultures
Université catholique de Louvain



Ce rapport final a été rédigé par Ivan Sintzoff (Groupe Energie Biomasse – GEB - <http://www.term.ucl.ac.be/geb>) sur base des rapports intermédiaires de chaque équipe.

Remerciements

WOODSUSTAIN a été entièrement financé par les SSTC (<http://www.belspo.be>), Services Scientifiques, Techniques et Culturels du Gouvernement Fédéral Belge. WOODSUSTAIN est une étude qui a été faite durant la période 1997-2001 dans le cadre du "Plan d'Appui Scientifique à une Politique de Développement Durable".

TABLE DES MATIERES

1. Résumé	4
2. Les objectifs	5
Le problème global	5
Le but général de l'étude.....	5
Les objectifs de WOODSUSTAIN.....	5
3. La méthodologie.....	7
3.1. Les ressources en bois-énergie	7
3.2. Les technologies de production d'énergie à partir du bois	8
3.3. Les contributions du bois-énergie au développement soutenable.....	8
3.4. Améliorer la science de la culture du bois-énergie.....	8
3.5. Conseiller les décideurs politiques	8
4. Le potentiel de bois-énergie en Belgique	9
4.1. Estimation des résidus forestiers.....	9
4.2. Estimation des sous-produits dans l'industrie du bois et des déchets de bois dans le secteur de la construction et de la démolition.....	10
4.3. Estimation du potentiel des taillis à courte rotation	11
4.4. Estimation du potentiel total de bois-énergie et des coûts	12
5. La production d'énergie à partir du bois	14
5.1. Les technologies de production d'énergie à partir du bois	14
5.2. Les coûts et les impacts de la production des combustibles à partir du bois.....	14
5.3. Production d'énergie à partir de bois	20
6. Les contributions du bois-énergie au développement soutenable	23
6.1. Le bois-énergie réduit l'effet de serre	23
6.2. La création d'emplois dans les filières de production d'énergie à partir de bois	25
6.3. La rentabilité de la production d'énergie à partir de bois.....	26
7. Modélisation de la croissance des taillis de peuplier	27
7.1. Objectifs, hypothèses et limites	27
7.2. Choix des outils utilisés pour l'approche mathématique.....	28
7.3. Description des paramètres d'entrées des modèles	29
8. Conseil des décideurs régionaux et fédéraux.....	34
10. Evaluation finale & recherches futures.....	35
11. Abréviations.....	36
12. Références.....	37

1. Résumé

WOODSUSTAIN est un projet réalisé en partenariat entre 5 centres de recherches belges. Le projet a été initié et coordonné par GEB, le Groupe Energie Biomasse de l'Université catholique de Louvain. WOODSUSTAIN a eut pour but de préciser le potentiel de bois-énergie disponible en Belgique et d'évaluer les impacts du développement de l'utilisation du bois-énergie sur les émissions de gaz à effet de serre, sur la création d'emploi et sur l'économie locale.

Dans ce projet, GEB a analysé le cycle de vie de plusieurs systèmes de bois-énergie dans le but d'estimer la consommation d'énergie fossile, les émissions de CO₂ et les réductions d'émissions de CO₂ liées à l'utilisation du bois-énergie. Le CRA, Centre de Recherches Agronomiques, a estimé les quantités de bois disponible dans les forêts belges et dans l'industrie. ECOP, le Laboratoire des Grandes Cultures de l'Université catholique de Louvain, a estimé le potentiel de cultures de taillis à courte rotation en Belgique. Le CEE, Centre Entreprise Environnement de l'Université catholique de Louvain, a estimé la création d'emploi dans les systèmes bois-énergie et a analysé les paramètres économiques des projets bois-énergie. PLECO, le groupe de recherches de l'écologie de la plante et de la végétation de l'Université d'Antwerpen, a amélioré le modèle numérique de la croissance des taillis de peuplier.

Les estimations des quantités de bois disponibles dans les forêts pour la production d'énergie sont de 10 000 TJ/an et de 19 000 TJ/an dans l'industrie du bois (y compris dans l'industrie de la construction et de la démolition). La totalité de ce bois ne pourrait pas complètement être utilisée à des fins de production d'énergie parce que d'autres usages du bois sont déjà en partie développés, principalement par l'industrie du papier et des panneaux où 35% des résidus industriels de bois sont récupérés. En plus de cette ressource disponible aujourd'hui, WOODSUSTAIN a permis d'estimer le potentiel d'énergie qui pourrait être produite à partir de culture de taillis à courte rotation à 12 000 TJ/an.

Une projection raisonnable serait d'augmenter la consommation de bois-énergie de 10% par an, ce qui conduirait à une consommation annuelle de 30 000 TJ/an en 2010 et de 50 000 TJ/an en 2015. Cette utilisation du bois-énergie réduirait la combustion des combustibles fossiles et donc les émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile de 1,5 à 3,4 millions de tonnes de CO₂ en 2001 (c'est-à-dire de 1,2% à 2,7% des émissions totales belges en 1990 de gaz à effet de serre exprimé en équivalent CO₂). L'emploi nécessaire pour collecter et produire cette quantité importante de combustible local a été estimé entre 2 000 et 3 000 personnes occupées à temps plein. L'investissement total nécessaire pour construire suffisamment de centrales électriques, de centrales de cogénération et de chaufferies au bois a été évalué entre 1 000 et 2 500 millions d'euros.

2. Les objectifs

L'utilisation intensive des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) augmente dramatiquement la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ceci pourrait changer considérablement le climat de la Terre. L'approvisionnement en énergie au cours du 21^{ème} siècle est l'un des défis les plus importants de l'humanité. Comment pourrions-nous sécuriser un approvisionnement durable en énergie tout en limitant les dégâts causés à l'environnement et dont les conséquences toucheront les générations futures ? La seule solution est de substituer graduellement les sources d'énergie fossile par des sources d'énergie renouvelable comme le soleil, le vent ou le bois. En Belgique, le bois est la première source d'énergie renouvelable utilisée, mais cette consommation est loin d'être complète ou optimale. WOODSUSTAIN a pour but participer à l'amélioration de l'utilisation du bois-énergie.

Le problème global

Développer une utilisation durable du bois-énergie dans le but de (1) réduire les émissions nettes de CO₂, (2) créer des emplois durables et (3) d'améliorer l'économie belge en général.

(1) L'énergie renouvelable est très peu développée en Belgique. En 2000, elle couvrait moins de 1% de l'approvisionnement total en énergie primaire. Pire, alors que, durant les années 90, tous les pays européens ont augmenté la part des énergies renouvelables dans leur approvisionnement en énergie, la Belgique ne l'a pas fait. Les énergies renouvelables pourraient donc jouer un rôle important pour réduire les émissions de CO₂ en remplaçant les combustibles fossiles.

(2) Le développement du bois-énergie pourrait être une solution pour créer des nouveaux emplois. La production de combustibles à partir de bois est une activité assez intensive en main-d'œuvre et pourrait de la sorte réduire le chômage, particulièrement pour des travailleurs peu ou pas qualifiés.

(3) Les combustibles fossiles sont en majeure partie importés de pays hors Union Européenne. En réduisant cette importation et en augmentant l'utilisation de combustibles locaux, la Belgique améliorera son économie locale. Mieux, en développant avant d'autres les compétences liées au remplacement des combustibles fossiles, la Belgique sera plus compétitive pour exporter son savoir-faire technologique en la matière lorsque les autres pays ne disposeront plus d'assez de ressources fossiles ou que leur utilisation sera devenue plus chère.

Le but général de l'étude

Donner la meilleure information aux décideurs à propos des impacts futurs du développement de l'utilisation du bois-énergie en Belgique.

En Belgique, le développement actuel du bois-énergie et des énergies renouvelables n'est ni suffisant ni efficient. Pour améliorer l'utilisation des énergies renouvelables, les décideurs doivent être bien informés des potentialités et des contraintes liées à cet objectif. Comme c'est le cas pour d'autres problématiques environnementales, la décision politique joue un rôle capital pour le développement des énergies renouvelables.

Les objectifs de WOODSUSTAIN

Rassembler les données sur (1) les ressources et les demandes en bois-énergie, et (2) les technologies du bois-énergie disponibles en Belgique dans le but d'évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques du développement futur du bois-énergie.

En Belgique, il y a un manque d'information sur les ressources en bois-énergie et sur les technologies. Le premier objectif de ce projet était de rassembler suffisamment d'information pour préciser comment l'utilisation du bois-énergie pourrait être développée. Les principales questions qui se posent sont de savoir (1) combien de bois pourrait être utilisé pour la production d'énergie ?, (2) à quel coût le bois-énergie pourrait être développé ?, (3) quelles sont les

meilleures pratiques dans le but d'éviter le gaspillage de l'énergie provenant du bois ?, (4) quelles sont les meilleures pratiques pour créer plus d'emplois dans le secteur du bois-énergie ?, (5) quelles sont les meilleures décisions politiques pour développer un secteur du bois-énergie qui soit durable à long terme ?

Notre travail est une contribution à l'évaluation des systèmes énergétiques. Nous avons analysé l'ensemble des chaînes d'approvisionnement en énergie, du berceau à la tombe des produits. Nous avons calculé les rendements de conversion et fait les bilans carbone de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement et de conversion du bois en énergie dans le but de comparer la réduction d'émissions de CO₂ de chaque système énergétique dans son ensemble. La méthodologie choisie se concentre sur les émissions de dioxyde de carbone et sur le facteur de réduction de ces émissions.

En intégrant les aspects environnementaux (émissions de CO₂), et les aspects socio-économiques (coûts/bénéfices et création d'emplois), nous proposons un outil d'aide à la décision politique. En étudiant différents scénarios de développement du bois-énergie, nous pouvons évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques des décisions politiques en matière de soutien aux énergies renouvelables.

3. La méthodologie

En Belgique, le bois est la première source d'énergie renouvelable utilisée, principalement pour le chauffage domestique et la production d'énergie des papeteries. Mais la plupart de nos sources d'énergie provenant du bois sont actuellement gaspillées : les premières éclaircies forestières, les bois d'élagage des parcs et jardins, le bois d'emballage industriel, etc. Si les résidus de bois étaient correctement consommés, cela pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre de la Belgique de 1.5 to 3.4 millions tonnes de CO₂. Mais ce résultat pourrait seulement être atteint en développant des modes d'utilisation efficaces du bois-énergie qui tiennent compte de l'entièreté des chaînes d'approvisionnement, depuis la récolte de la ressource en bois (en forêts, en industries, etc.) jusqu'à la production finale d'énergie (chaleur, électricité ou cogénération).

Comme c'est le cas pour tous les développements industriels, le développement des énergies renouvelables aura des impacts environnementaux et socio-économiques. Le but du projet WOODSUSTAIN est d'évaluer les impacts des systèmes d'approvisionnement en bois-énergie sur le développement durable en Belgique. Nous étudions à la fois les impacts sur les émissions de CO₂ et les impacts sur la création d'emplois en relation directe avec le développement de nouvelles voies d'approvisionnement en énergie en Belgique.

Voici les quatre principales parties du projet :

- 1- classier & évaluer les ressources en bois disponibles pour la production d'énergie en Belgique,
- 2- classier et évaluer les technologies de conversion du bois en énergie
- 3- évaluer les contributions du bois-énergie au développement durable
- 4- améliorer la connaissance des cultures énergétiques de bois
- 5- proposer les mesures qui favoriseront les systèmes d'approvisionnement en bois-énergie les plus soutenables.

La première étape de WOODSUSTAIN a été d'évaluer les ressources de bois disponibles en Belgique dans les différents secteurs suivants : les résidus forestiers, les déchets de bois d'origine industrielle, la culture de taillis à courte rotation, les déchets de bois issus de la construction et de la démolition, etc. ECOP et CRA ont directement interrogé les forestiers, les fermiers et les industriels du bois, puis ont extrapolé les données collectées à l'ensemble de la Belgique.

A partir de ces estimations, nous considérons différentes manières de produire de l'énergie à partir du bois et nous les étudions dans le but d'identifier le meilleur usage de chaque ressource disponible. GEB et CEE ont étudié chaque étape de la transformation du bois en énergie (la récolte du bois, le broyage, le stockage et le séchage, le transport, la gazéification et la combustion). Dans le but d'évaluer les impacts sur le développement durable, nous avons tenu compte des bilans énergétiques et des bilans d'émissions de gaz à effet de serre, des coûts et bénéfiques et de la création d'emplois.

Pour compléter le tableau, et particulièrement celui des cultures ligneuses de taillis à courte rotation, PLECO a modélisé les bilans biologiques de carbone dans ces cultures. La prédiction de la croissance des taillis de bois et la prédiction des flux de carbone dans la plante ont été fortement améliorées par la modélisation mathématique.

3.1. Les ressources en bois-énergie

Le premier objectif du projet est d'améliorer la connaissance des quantités réelles de bois qui sont disponibles pour la production d'énergie en Belgique. Cette partie du travail a été réalisée par le partenaire 2 (CRA) et le partenaire 5 (ECOP). La coordination a été faite par le partenaire 1 (GEB). La durée de ce travail a été de 18 mois. La majeure partie de ce travail a été faite dans ce délais mais de l'information complémentaire a été collectée durant la phase suivante du projet.

3.2. Les technologies de production d'énergie à partir du bois

Le deuxième objectif du projet est de mieux comprendre les technologies de conversion du bois en énergie qui peuvent augmenter l'utilisation du bois comme source d'énergie en Belgique. Différentes technologies ont été analysées par les partenaires 2 (CRA) et 1 (GEB) : la production de combustibles à partir de bois (la récolte, le broyage/déchetage, le transport, le stockage et le séchage et la densification) et la production d'énergie finale à partir de bois combustible (les poêles, les chaudières, et les centrales électriques).

3.3. Les contributions du bois-énergie au développement soutenable

Le troisième objectif est d'évaluer les contributions du bois-énergie au développement soutenable en Belgique en s'intéressant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à l'amélioration de l'économie locale et à la création d'emplois dans les filières du bois-énergie. Ce travail a été réalisé par la partenaire 1 (GEB) et le partenaire 3 (CEE) avec l'aide précieuse des partenaires 2 (CRA) et 5 (ECOP).

3.4. Améliorer la science de la culture du bois-énergie

PLECO/UIA a amélioré la connaissance de la culture du bois-énergie en simulant les effets des différents traitements sur la quantité de carbone produit, pour différents clones de peuplier. Cela a été fait en adaptant et en développant une approche mathématique de modélisation de la quantité de carbone récoltable, produit en 3 ans de croissance végétale. Ce modèle a été fait pour différents clones de taillis de peupliers.

La modélisation de la croissance des taillis de peuplier a été divisée en trois parties complémentaires: (1) une approche tri-dimensionnelle de l'architecture du taillis, (2) un modèle de l'interception de la radiation lumineuse et (3) un modèle de l'allocation du carbone capté par la plante dans les différentes parties récoltables (tiges et branches) et dans les différentes parties non-récoltables (souches & feuilles).

Un procédé expérimental a été effectué pour obtenir une information précise sur le développement, la croissance et l'architecture des taillis de peupliers. Ce travail a été limité à trois clones : Hoogvorst, Fritzi Pauley et Wolterson.

3.5. Conseiller les décideurs politiques

A la fin du projet, GEB a contacté les autorités fédérales et régionales pour présenter et discuter des principaux résultats de WOODSUSTAIN et pour proposer des solutions qui faciliteront le développement du bois-énergie en Belgique.

4. Le potentiel de bois-énergie en Belgique

Les sources de bois-énergie proviennent principalement du secteur du bois. A chaque étape de la transformation du bois, il y a une production de déchets de bois. Ces résidus ont été caractérisés et quantifiés.

4.1. Estimation des résidus forestiers

Pour chaque type de forêt, le CRA a estimé la disponibilité annuelle moyenne de rémanents. Ceci a été fait en (i) estimant les surfaces des forêts belges, (ii) estimant le volume de rémanents forestiers en fonction des pratiques de récolte, (iii) multipliant les surfaces estimées par le volume estimé de résidus.

Le CRA a estimé la surface totale des forêts en Belgique sur base de l'*inventaire permanent des ressources ligneuses en Wallonie* [Rondeux, 1995], et du *bosinventarisatie Vlaanderen van het Vlaamse Gewest* [Bosinventarisatie, 1998].

Dans les forêts feuillues, la seule pratique de récolte utilisée actuellement est celle des éclaircies légères et régulières. Le CRA suppose que les rémanents abandonnés lors des éclaircies légères représentent 30% du volume de grumes récoltés. Avec une densité moyenne de 0,55 tms/m³ et, en Belgique, une récolte moyenne de 4 m³/ha/a de grumes, le CRA a estimé la disponibilité moyenne de rémanents dans les forêts feuillues de 0,66 tms/ha/a. Dans les forêts de résineux, les rémanents proviennent des premières éclaircies et des coupes à blancs. Les hypothèses sont que les rémanents représentent 25% du volume de grumes récoltés et la masse moyenne de bois récolté par coupe à blanc est estimée à 40 tms/ha dans les forêts privées et 33 tms/ha dans les forêts publiques. L'estimation du volume récolté lors des premières éclaircies s'établit à 17 tms/ha.

Le CRA estime que chaque année 224 000 tms/a de rémanents forestiers sont annuellement abandonnés dans les forêts de feuillus et les cultures de peupliers et de l'ordre de 321 000 tms/a de rémanents forestiers dans les forêts de résineux. En rajoutant la forêt bruxelloise, il y a environ 546 000 tms/a de rémanents forestiers annuellement abandonnés dans les forêts belges. En se basant sur une estimation de 290 000 ha de forêts feuillues et de 252 000 ha de forêts résineuses, le taux moyen de rémanents est estimé autour de 0,7 tms/ha/a dans les forêts feuillues et de 1,3 tms/ha/a dans les forêts résineuses.

Après l'intégration et la confrontation de ces données avec celles d'autres études, le GEB a noté que les résultats du CRA doivent être considérés avec précaution. Dans les années 80, la croissance annuelle de la forêt a été estimée à une moyenne de 3.0 tms/ha/a dans les forêts feuillues et à une moyenne de 5.6 tms/ha/a dans les forêts (ce qui représente une croissance naturelle de 2 280 000 tms/a) [Fast, 1988]. L'estimation des rémanents disponibles faite par le CRA représente donc environ 24% de l'augmentation naturelle de la matière végétale des forêts belges. Ce chiffre semble relativement élevé si nous tenons compte que le taux de récolte de bois dans les forêts belges est déjà de 65% (2,2 millions m³/a récoltés sur les 3,4 millions m³ de croissance biologique [CdB, 1985]). Si les 24% disponibles sous forme de résidus forestiers étaient récoltés pour la production d'énergie, le taux total de bois récoltés représenterait 89% de la croissance biologique. Les experts internationaux recommandent de limiter la récolte totale de bois en dessous de 80% de la croissance naturelle. Dans ce cas, vu le taux de récolte déjà important, les résidus de bois disponibles et récoltables dans les forêts devraient se limiter à 15% de la croissance biologique, soit environ 342 000 tms/a.

Le CRA et le CEE ont évalué le coût de récolte des rémanents forestiers. En fonction du type de rémanent et du choix de la pratique de récolte, le coût de production des plaquettes forestières est situé entre 40 EUR/tms et 80 EUR/tms.

4.2. Estimation des sous-produits dans l'industrie du bois et des déchets de bois dans le secteur de la construction et de la démolition

Le CRA a réalisé une étude sur la production de sous-produits de bois dans les industries du bois en Belgique. Cette étude divise le secteur du bois en 6 activités principales : les scieries, les menuiseries, les fabriques de meubles, l'industrie de l'emballage, les entreprises de la construction ou de la démolition et les autres secteurs. La première enquête a été faite par courrier postal et téléphone en collaboration étroite avec la "Fédération Nationale des Scieries". Le CRA a estimé le nombre total de scieries situées en Belgique à 230. L'enquête a permis de contacter 114 entreprises, représentant 80% du chiffre d'affaire annuel, dont 78 ont donné des réponses exploitables. La seconde enquête a été faite par fax avec la "Fédération wallonne des Menuisiers et des Métiers Connexes" et la "Federatie van de Algemene Aannemers van Schrijnwerk en Aanverwante Beroepen". Le CRA estime qu'il y a à peu près 5 000 entreprises actives dans le secteur de la menuiserie. Un échantillon de 343 entreprises a été réalisé au hasard. Mais seules 10% of ces entreprises ont répondu. La troisième enquête a été faite par téléphone auprès de 53 entreprises des 163 usines de meubles qui ont été identifiées par le CRA. La quatrième enquête a été faite par téléphone auprès de 22 des 44 entreprises qui fabriquent des palettes et des caisses. La "Confédération Nationale de la Construction" regroupe 14 000 entreprises travaillant dans les activités de la construction, le nettoyage, le chauffage/ventilation/conditionnement d'air, de l'électricité et du béton. Le CRA a réalisé une enquête par courrier auprès de 790 entreprises de plus de 10 employés dont 112 ont répondu. Pour les autres secteurs, une enquête téléphonique a été faite auprès de 68 entreprises dont 33 ont fourni assez de données.

Les données récoltées par le CRA sont essentielles pour préciser la production de déchets de bois produits dans l'industrie belge (écorce, chutes de coupe, copeaux, sciures, etc.). La production totale a été estimée à 857 000 tms/a, dont 46% proviennent des scieries, 25% des menuiseries, 9% aux fabriques de meubles, 4% des industries de l'emballage, 14% de la construction et de la démolition, et 2% des autres secteurs. Ce bois n'est pas entièrement disponible pour produire de l'énergie parce que 35% est déjà consommé dans l'industrie du papier et des panneaux. Le reste est principalement brûlé (26%) ou mis en décharge (19%).

Le CRA a estimé la valeur de ces sous-produits en demandant aux entreprises sondées le prix actuel qu'elles reçoivent lors de la valorisation de leurs sous-produits ou le coût pour s'en débarrasser : les écorces sont valorisées entre -40 et +50 EUR/tms, les plaquettes entre 17 et 72 EUR/tms, la sciure entre 0 et 50 EUR/tms, le bois de démolition entre -75 et -25 EUR/tms. Ces valeurs varient fortement en fonction de la qualité du sous-produit, de la distance entre l'entreprise et l'utilisateur des sous-produits et le volume de production.

Après les enquêtes du CRA, GEB a noté qu'il restait une certaine incertitude sur les estimations des quantités de bois disponibles. Dans le but de vérifier les résultats obtenus, GEB les a comparé avec les ratios obtenus lors d'enquêtes similaires faites en France auprès de 4700 entreprises [CTBA, 1992]. En appliquant les mêmes ratios de déchets par rapport aux volumes de produits finis, un total de 808 000 tms/a de sous-produits devrait être disponible dans les scieries, les menuiseries et les fabriques de meubles alors que le CRA estime ces déchets à 685 000 tms/a. Nous ne pouvons pas expliquer cette légère différence. Une différence plus importante est observée entre les estimations du CRA et les ratios du CTBA à propos du secteur des fabriques de meubles (cfr. Table 1). Dans ce cas, la faible représentativité de l'échantillon sondé par le CRA (16 entreprises sur 163) pourrait être une raison. Une seconde cause d'incertitude provient du fait que, dans ce secteur, de nombreuses entreprises brûlent directement leurs résidus et que par ce fait, elles ne connaissent pas exactement la quantité de déchets produite. Dans le secteur de la construction et de la démolition, les estimations ne sont pas très éloignées des statistiques de l'IBGE qui estiment cette production à 15 000 tms/a pour Bruxelles, ce qui, extrapolé à la Belgique entière, donnerait approximativement 160 000 tms/a [IBGE, 1997]. En comparant les autres enquêtes, il apparaît que l'enquête du CRA sous-estime fortement l'estimation de déchets de bois disponibles dans les autres secteurs. Le CRA n'a pas tenu compte des quantités de bois disponibles sous forme de palettes usagées. Or, cela représenterait à peu près 200 000 tms/a de palettes qui ne sont pas recyclées en Belgique [ITER, 1998]. Une autre source de résidus de bois se situe dans les déchets ménagers. On estime qu'il

y aurait de la sorte une moyenne de 2 kg/pers/a, cela représente 20 000 tms/a en Belgique [ECO-Conseil, 1995]. Finalement les résidus de bois qui proviennent de l'élagage des arbres en horticultures et de l'entretien des parcs, jardins et bords de routes pourrait aussi produire à peu près 30 000 tms/a en Wallonie [Plan Wallon des Déchets, 1998, p.355].

Table 1	Consommation de bois Estimations du CRA Mm ³ /a	Sous-produits de bois d'origine industrielle	
		Enquêtes du CRA x1 000 tms/a	Ratios du CTBA & autres sources x1 000 tms/a
Scieries	1.58	391	443
Menuiseries	0.69	188	179
Fabriques de meubles	0.68	80	186
<i>Sous-Total</i>		<i>685</i>	<i>808</i>
Usines d'emballages	0,10	30	n.a.
Construction/Démolition	n.a.	124	160
Autres industries	n.a.	18	250
<i>Estimation finale</i>		<i>973,000 tms/a</i>	

Enfin, notons qu'il persiste d'assez grandes incertitudes sur les estimations de la valeur de ces déchets de bois. Cette valeur dépend d'un grand nombre de paramètres : la qualité du bois, la distance du principal utilisateur, etc. De plus, ces incertitudes sont amplifiées par le fait qu'il y a aussi des incertitudes sur la qualité du bois. Les producteurs de sous-produits de bois ne connaissent pas bien la qualité du bois (humidité et masse volumique apparent) de telle sorte que même en connaissant la valeur du bois par volume ou par masse (EUR/m³ or EUR/ton), il est toujours compliqué d'avoir une bonne estimation de la valeur du bois par unité d'énergie (EUR/GJ).

4.3. Estimation du potentiel des taillis à courte rotation

ECOP a estimé le potentiel énergétique des cultures de taillis à très courte rotation (TtCR) plantés sur des terres agricoles. ECOP a décrit les caractéristiques et les pratiques culturales du TtCR. ECOP a fait une enquête en visitant et en interrogeant un échantillon de fermiers belges. ECOP a aussi analysé le potentiel énergétique des cultures de TtCR sur des terrains spéciaux comme d'anciennes décharges publiques, 'anciens terrains industriels contaminés ou des bords de routes. Finalement, ECOP a testé l'utilisation d'un SIG (système d'information géographique) pour aider à la prise de décision en matière d'implémentation de nouvelles cultures de TtCR.

L'échantillon de fermiers a été composé de 30 fermiers dont l'exploitation est située dans les 14 régions agricoles de la Belgique. L'enquête apporte une information précieuse sur la volonté des fermiers à convertir quelques hectares de leur exploitation à la culture de TtCR. La principale information est le gain minimum demandé par le fermier pour s'intéresser à cette nouvelle culture. Ce gain net se situe entre 450 EUR/ha/a (quand le fermier est un producteur de viande) jusqu'à 800 EUR/ha/a (quand le fermier est un producteur de lait). La seconde information est la surface que chaque fermier accepterait de convertir si ce gain net minimum lui était assuré en plantant du TtCR. Ce taux de conversion potentiel varie de 0% à 15%. Seuls 30% des fermiers refusent de planter des TtCR.

ECOP a proposé trois scénarios possibles pour le développement du TtCR dans le but d'augmenter la production de bois-énergie en Belgique dans le secteur de l'agriculture. Le scénario médian suppose que 5% de la Surface Totale Agricole Utile de la Belgique (TSAU) sera convertie à la culture de TtCR. Dans ce cas, 66 000 ha seraient planter principalement dans la région Ardenne-Jura (10% de la SAU) et dans le Condroz (8% de la SAU). En tenant compte de la productivité de chaque région, ECOP estime que la production de bois-énergie serait de 717 000 tms/a. Dans le scénario minimal (maximal), la culture de TtCR représenterait 3% (7%) de la SAU, c'est-à-dire 36 000 ha (98 000 ha), produisant environ 402 000 tms/a (1 065 000 tms/a).

GEB a confronté ces prévisions et estimations avec d'autres études européennes. Il en ressort que les prévisions de ECOP sont en parfait accord avec le scénario principal de la Commission européenne (White Paper, 1997) qui propose la plantation de 6,3 millions hectares de cultures cellulósiques à des fins énergétiques d'ici 2010. Ce qui représenterait 4-5% de la SAU européenne. La productivité moyenne estimée par ECOP à 10,8 tms/ha/a n'est pas très éloignée de l'estimation européenne de 10 tms/ha/a. Nous pouvons dès lors accepter le scénario médian de ECOP comme une bonne estimation du développement futur des cultures ligno-cellulosiques à des fins énergétiques. Notons que si le TtCR était remplacé par une autre plante ligneuse (comme le miscanthus), le potentiel énergétique estimé ne serait pas fondamentalement différent.

4.4. Estimation du potentiel total de bois-énergie et des coûts

GEB a coordonné ces études et a intégré les résultats dans une base de données dans le but de tracer la courbe belge d'approvisionnement en bois-énergie. A la fin de cette tâche, GEB a confronté ces informations aux autres rapports et études dans le but d'estimer la précision des données collectées.

GEB a agrégé toutes les données provenant du CRA et de ECOP pour obtenir la courbe d'approvisionnement en bois-énergie. Cette courbe tient compte des quantités de bois et de la valeur ou le coût de chaque source de bois disponible comme combustible (Table 2). La courbe d'approvisionnement décrit la disponibilité de combustible ligneux en Belgique (Figure 1). GEB a aussi intégré les incertitudes sur les quantités de bois réellement disponible en utilisant une valeur moyenne et une déviation maximale. Les coûts du combustible sont décrits par une valeur minimale et une valeur maximale.

Table 2	Quantité estimée TJ/an	Incertitude estimée TJ/an	Coût moyen estimé EUR/GJ	Coût minimal EUR/GJ	Coût maximal EUR/GJ
Total rémanents forestiers (sauf souches)	10 158	0	3,5	1,6	8,8
Scénario médian de production de TtCR	12 902	6 300	4,0	2,7	11,0
Sous-produits de scieries	7 506	468	0,3	-2,1	7,6
Sous-produits de menuiseries	3 537	315	0,1	-1,2	1,6
Résidus de la fabrication de meubles	2 474	986	0,1	0,0	2,7
Résidus de l'industrie des emballages	557	0	-0,1	-4,0	2,1
Bois de construction & de démolition	2 552	324	-0,6	-4,0	0,0
Résidus de bois des autres industries	2 412	2 088	-0,6	-4,0	0,0
Total bois-énergie	42 098	10 481	2,1	-4,0	11,0

Availability of wood energy in Belgium (GEB, WOODSUSTAIN)

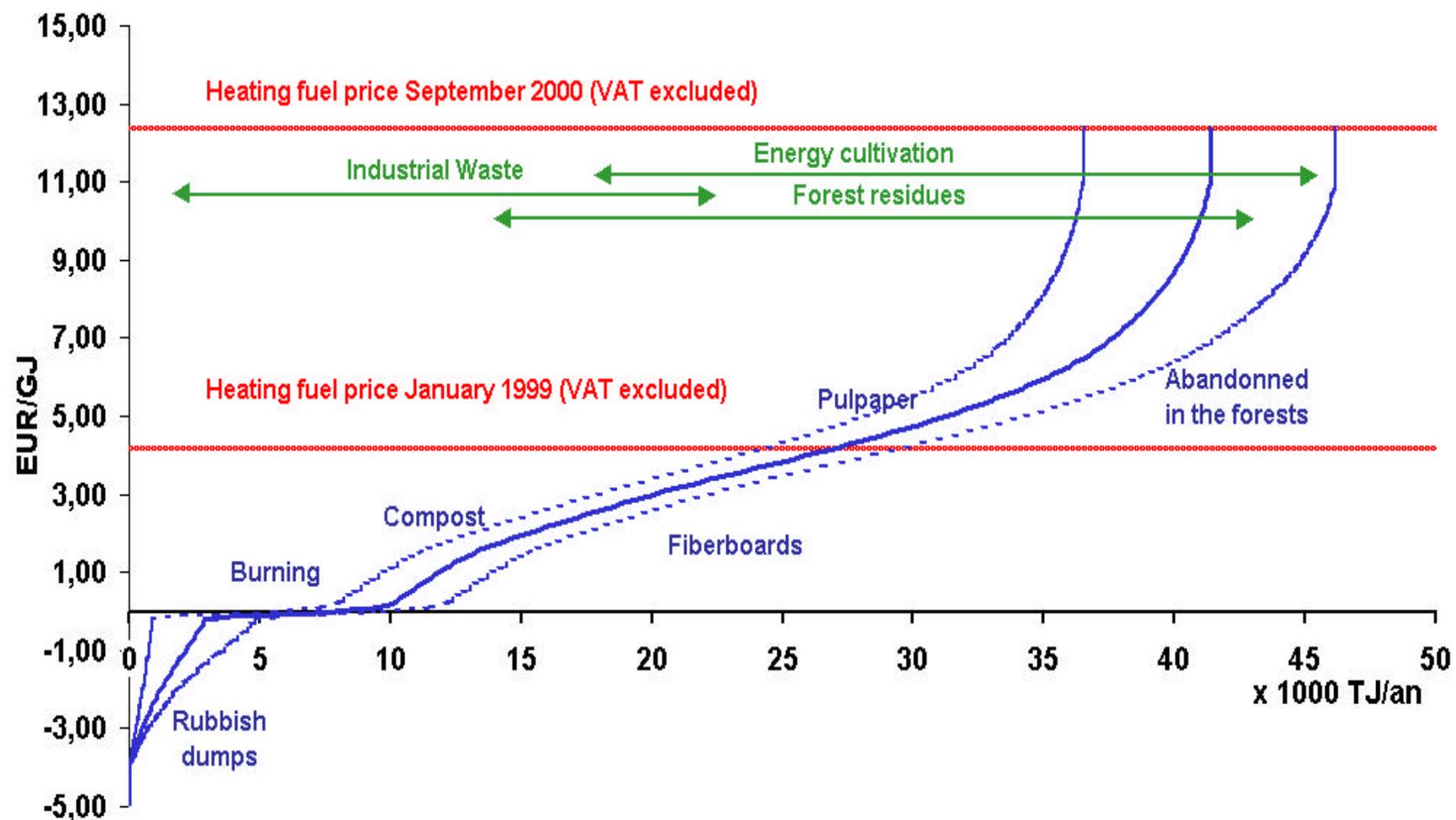


Figure 1 – Disponibilité de bois-énergie en Belgique
(tracé par GEB, sur base de données du CRA, ECOP et de GEB).

5. La production d'énergie à partir du bois

5.1. Les technologies de production d'énergie à partir du bois

Le CRA a analysé les différents systèmes de production de combustibles à partir des ressources en bois. Cela a été fait sur base de la littérature et sur base de documentations techniques (37 broyeurs mobiles & 16 broyeurs fixes). La description du transport du bois a aussi été faite. Le temps a manqué pour analyser les techniques de séchage du bois combustible, la fabrication de granulés de bois et la densification du bois en bûches. GEB et le CEE ont complété, dans la mesure du possible, ce manque d'information sur base des données disponibles dans la littérature.

Le CEE et GEB ont analysé les différents systèmes de production du combustible. Le CEE s'est concentré sur les aspects économiques et sociaux. En se basant sur l'analyse des technologies faite par le CRA, le CEE a estimé les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation lors de la production de combustible à partir des différentes ressources de bois. Ce travail a conduit à l'estimation d'un coût spécifique de production différent pour chaque type de combustible produit (exprimé en EUR/tms et en EUR/GJ). Pour évaluer l'impact social du développement du bois-énergie, le CEE a estimé la main d'œuvre nécessaire pour produire 1 tonne de combustible à partir des différentes ressources en bois (exprimé en heure/tms et en heure/GJ).

GEB s'est concentré sur les impacts énergétiques et environnementaux (limité aux émissions de CO₂). GEB a appliqué la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie (LCA – Life Cycle Analysis¹) aux différents systèmes de production des combustibles. En ajoutant les consommations d'énergie de la récolte de la ressources en bois, du broyage, du transport, du stockage et du séchage, GEB a pu estimer la consommation d'énergie pour produire le bois-énergie. Cette évaluation a conduit à une estimation des émissions de CO₂ liées à la production de bois-énergie.

Le GEB a décrit les principes thermodynamiques qui sont impliqués dans la conversion du bois en énergie : la pyrolyse, la gazéification et la combustion. GEB a analysé les technologies actuelles qui sont disponibles pour la production de bois-énergie : les poêles, les chaudières, les groupes gazo-électrogènes, les centrales à cycle vapeur, les centrales à co-combustion de bois et de charbon, les cycles combinés intégrant la gazéification de la biomasse. Finalement, GEB a analysé les technologies de conversion du bois en énergie qui sont actuellement utilisées en Europe et en Amérique du Nord : 77 chaudières à bois pour la production de chaleur et 91 centrales électriques de production d'électricité (et de chaleur).

5.2. Les coûts et les impacts de la production des combustibles à partir du bois

Les différents systèmes de production des combustibles à partir du bois ont été identifiés et analysés. Les étapes de production des combustibles sont : la culture, la récolte, le broyage ou déchiquetage, le transport, le stockage, le séchage, la fabrication de granulés, la densification en bûchettes. Suivant la ressources initiales du bois et le type d'utilisation de l'énergie finale, une ou plusieurs de ces opérations sont utilisées. Par exemple, la production d'un combustible directement utilisable à partir d'une culture de TtCR pourrait être décomposée en 4 étapes (la culture, la récolte avec broyage intégré, le transport et le stockage ou le séchage) tandis que la production de granulés de bois à partir de sciure de séchage pourrait par exemple être décomposée en 4 étapes totalement différentes (le transport, le stockage et le séchage, la fabrication de granulés et le transport des granulés).

Avec l'aide de ECOP et du CRA, GEB et CEE ont modélisé la culture de TtCR, la récolte des résidus forestiers, le transport des combustibles, le stockage et le séchage des combustibles et la densification de sciure.

La culture de TtCR a été décomposée en différentes opérations nécessaires pour produire du bois sur des terres agricoles : l'établissement de la culture (la fertilisation, la protection contre les herbes et les pestes, le traitement du sol, labourage, l'affinement du sol, la plantation, la clôture),

¹ Selon la norme ISO 14040.

l'année d'établissement (fertilisation, protection contre les herbes & les pestes), la première coupe, les 7 cycles de production de 3 ans, récolte, broyage en plaquettes. Plusieurs scénarios ont été comparés : une utilisation intensive ou peu intensive des fertilisants, un contrôle mécanique ou chimique des herbes et des pestes, une récolte manuelle ou mécanique et une récolte soit en tiges, en ballots ou directement en plaquettes.

La production du combustible à partir des cultures de TtCR apparaît relativement chère en comparaison au coût de production des déchets de bois ou au coût de l'énergie fossile dans les années 90. Le coût moyen le plus bas pour la production de plaquettes de bois à partir de TtCR est de 125 EUR/tms (soit 50% plus cher que le coût de du mazout d'origine pétrolière). La récolte de TtCR et la fabrication de plaquettes de bois est intensive en main-d'œuvre, c'est-à-dire 2,2 heure/tms. La consommation d'énergie pour la culture du TtCR est principalement causée par l'utilisation de fertilisants, le carburant pour assurer la maintenance de la plantation et le carburant pour la récolte et le broyage. La consommation d'énergie émet environ 100 kgCO₂/tms, c'est-à-dire 5,5 kgCO₂ par GJ d'énergie primaire.

La récolte des rémanents forestiers a été modélisée en 6 scénarios différents en fonction du degré de mécanisation. Les récoltes peu mécanisées sont bien adaptées aux forêts feuillues alors que les récoltes très mécanisées conviennent uniquement aux rémanents des coupes à blancs. Le coût de production des plaquettes forestières est de l'ordre de 40 à 60 EUR/tms (Figure 2). Suivant le type de récolte forestière, le besoin de main d'œuvre est de 0,4 heures/tms (très mécanisée) à 2,3 heures/tms (peu mécanisée). La consommation d'énergie fossile est limitée à la consommation de carburant pour les opérations mécanisées, entre 0,3 et 0,7 GJ/tms, émettant entre 22 et 50 kgCO₂/tms (soit, 1-3 kgCO₂/GJ).

Pour les résidus industriels, le broyage fixe a été analysé. Suivant la taille du broyeur et de la production annuelle (tms/a), le CEE a obtenu une formule classique pour calculer le coût du broyage en EUR/tms ($\text{coût_broyage} = a \cdot (\text{production_annuelle})^{-b}$ avec $a = 7090$ EUR/tms et $b = 0,7026$). C'est à dire environ 50 EUR/tms pour une production annuelle inférieure à 2 000 tms/a, et autour de 10 EUR/tms pour une production annuelle de plus de 10 000 tms/a. La main d'œuvre nécessaire est de l'ordre de 0,1 à 1,4 heure/tms. Le coût énergétique du broyage en plaquettes est de 0,3-0,8 GJ/tms (suivant la même formule avec $a = 13\,726$ MJ/tms et $b = 0,4324$), émettant 7-30 kgCO₂/tms.

Les plaquettes de bois doivent être transportées depuis le lieu de production jusqu'au lieu de leur utilisation. Les plaquettes sont soit transportées dans des remorques, soit dans des containers. GEB et CEE ont analysé 3 types de transport routier : un tracteur agricole ou forestier tractant

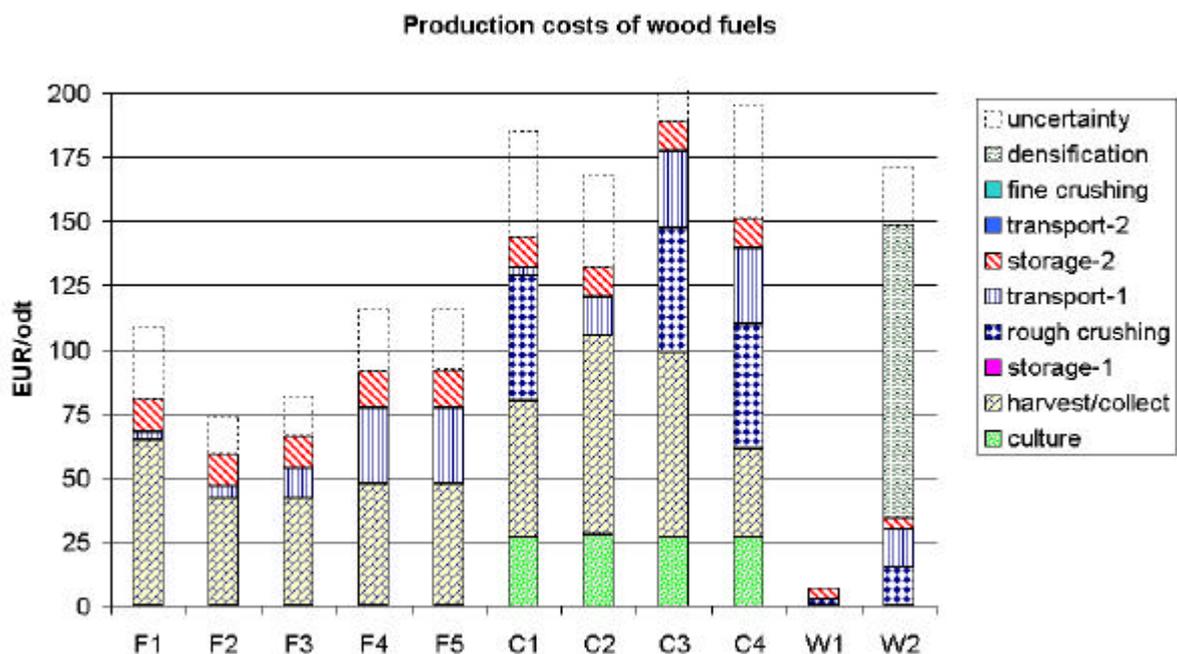


Figure 2 – Décomposition des coûts de production des 11 principales filières de production de bois-énergie.

une remorque, un petit camion (30 m³) ou un grand camion (90 m³). Les coûts de transport sont estimés autour de 4,2 EUR/tms pour les courtes distances (moins de 20 km), 8 EUR/tms pour le transport régional (autour de 75km) et 32 EUR/tms pour le transport national (300 km). Ces valeurs sont fortement liées à la distance parcourue (km) et à la masse sèche par volume transporté (tms/m³). La main d'œuvre est respectivement de 0,2 ± 0,1 (25 km), de 0,6 ± 0,4 (75 km) et de 0,8 ± 0,3 (300 km) heure/tms. La consommation d'énergie est respectivement estimée à 0,17 ± 0,01, 0,18 ± 0,11 et 0,74 ± 0,44 GJ/tms, émettant 10 ± 1, 11 ± 7 et 46 ± 28 kgCO₂/tms.

Le stockage des plaquettes de bois peut être fait avec ou sans ventilation et séchage. Le séchage naturel ne coûte rien de plus que la surface et cela évite aussi toute consommation d'énergie. Mais, le séchage naturel peut conduire à des pertes de matière ligneuse par fermentation. La Figure 3 indique l'évolution de l'humidité du bois et l'évolution des pertes de matières durant le séchage naturel (les données proviennent de IEPF, 1994, ADEME, 1998 et EWAB, 1996). Après une demi année, à peu près 10-15% du bois a fermenté et est définitivement perdu. En séchant ou même simplement en ventilant le bois, le stockage est assez consommateur d'énergie, soit 1,8 ± 0,2 et 2,7 ± 0,1 GJ/tms, et les émissions de carbone sont de 65 ± 10 et 205 ± 10 kgCO₂/tms.

La densification ou la fabrication de granulés de bois sont deux étapes finales pour la production de combustibles standardisés : des bûchettes densifiées ou des granulés (pellets). Ces produits sont intéressants pour une utilisation domestique du bois-énergie. Malheureusement, il n'y a pas de site de production de ces produits en Belgique et la littérature est très pauvre sur ce sujet. CEE a collecté des données qui donnent une idée des coûts de production de ces produits entre 20 et 250 EUR/tms, avec un besoin en main d'œuvre de 5-25 heures/tms, avec une consommation d'énergie de 0,8-4,6 GJ/tms et des émissions de gaz à effet de serre de 11-140 kgCO₂/tms. Ces chiffres sont assez incertains en fonction du type de bois densifié et du type de technique utilisée.

GEB et CEE ont analysé 11 types d'approvisionnement en bois-énergie. En ajoutant toutes ces étapes de la production des combustibles, nous avons calculé le coût, main d'œuvre, énergie et les émissions de CO₂ des 11 types d'approvisionnement en combustibles (cfr. les tables 3, 4 et les figures 2, 4, 5, 6).

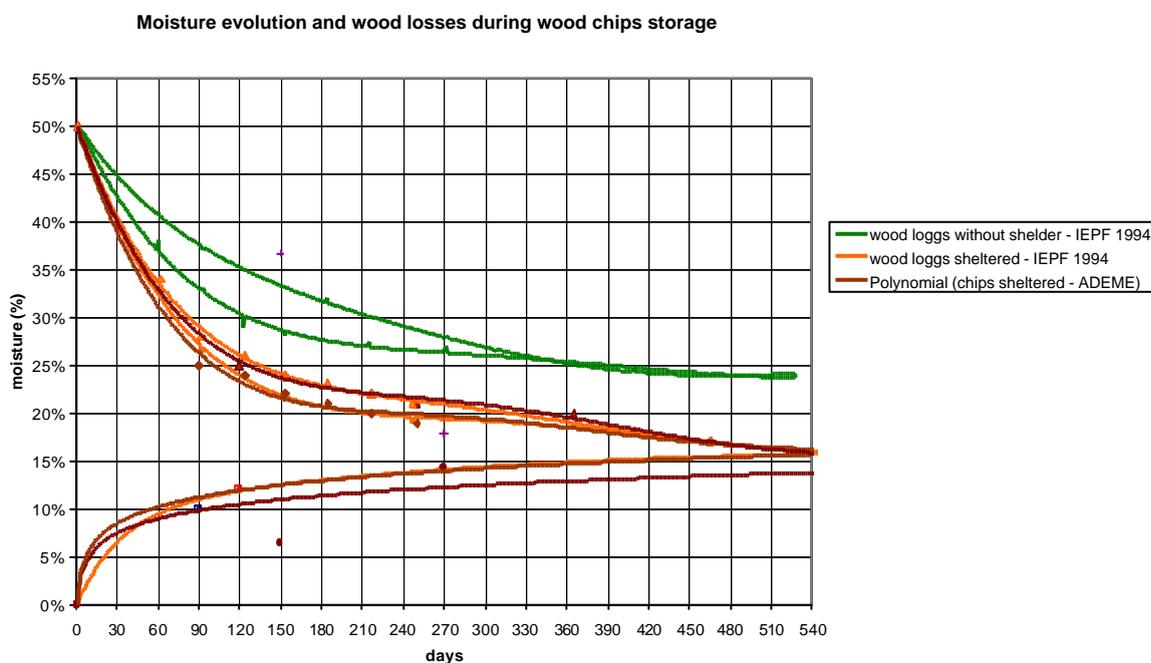


Figure 3 - Evolution de l'humidité du bois durant le stockage naturel et séchage des bûchettes et des plaquettes de bois.

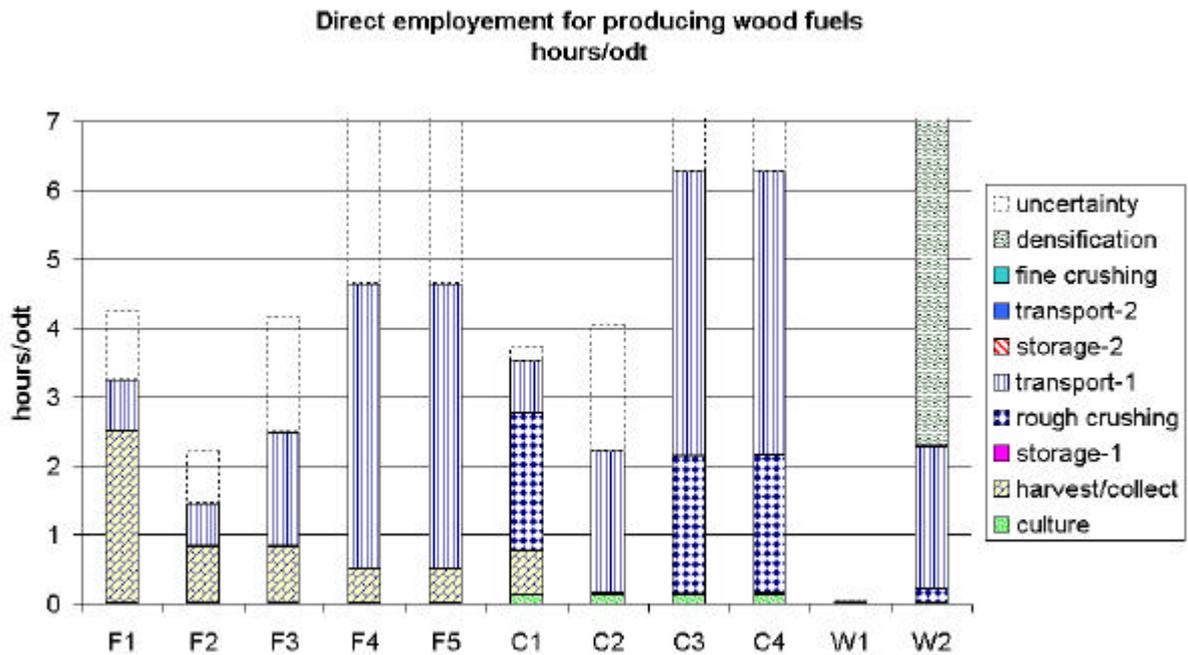


Figure 5 – Décomposition des besoins de main d'oeuvre des 11 principales filières de production de combustible à partir du bois.

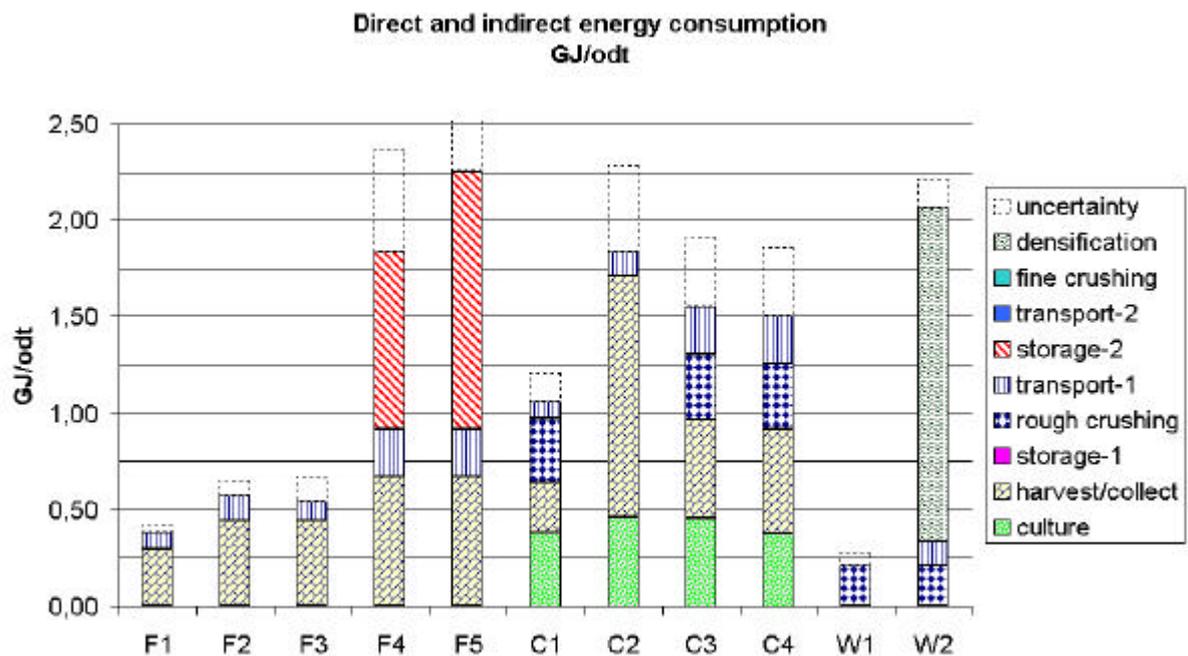


Figure 4 - Décomposition des consommations d'énergie des 11 principales filières de production de combustible à partir du bois.

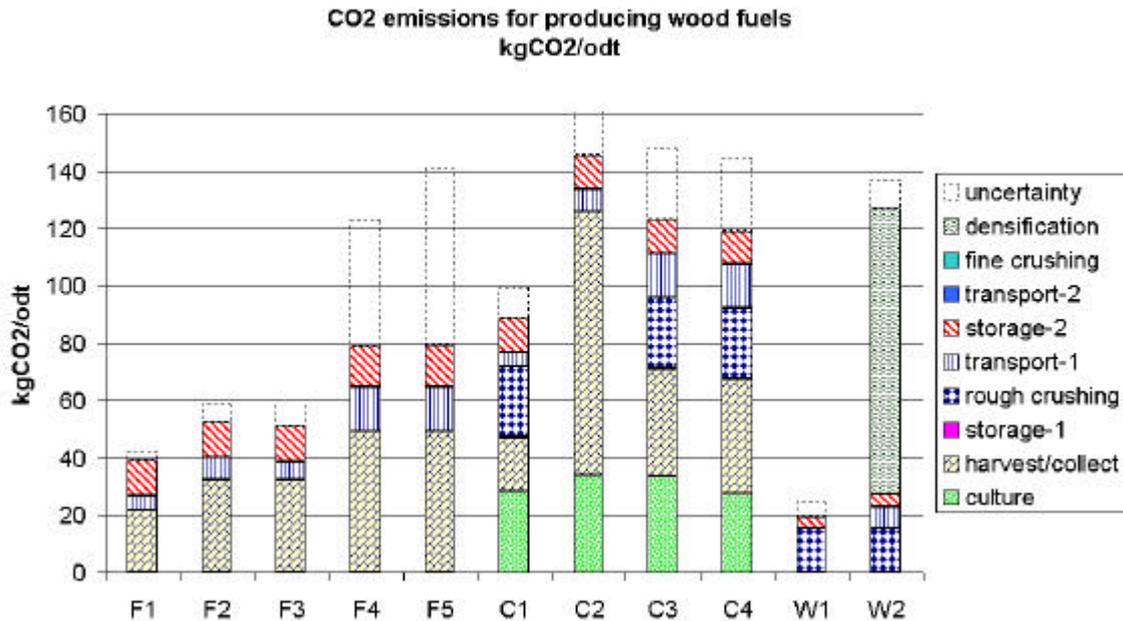


Figure 6 - Décomposition des émissions de CO₂ des 11 principales filières de production de combustible à partir du bois.

Table 3	Coûts de Production EUR/tms	Besoin en Main d'œuvre Heures/tms	Consommation d'énergie GJ/tms	Emissions de CO ₂ kgCO ₂ /tms
Les cultures de TtCR et les récoltes en chips :				
1. Peu intensif et récolte manuelle en tiges	153 ± 46	2,9 ± 0,2	1,15 ± 0,1	77 ± 11
2. Moyennement intensif + récolte mécanique	126 ± 36	0,2 ± 0,2	2,00 ± 0,3	147 ± 32
3. Très intensif + récolte mécanique en ballots	180 ± 53	2,2 ± 0,0	1,41 ± 0,2	104 ± 17
4. Très intensif + récolte mécanique en tiges	128 ± 38	2,2 ± 0,2	1,36 ± 0,2	100 ± 17
Récolte des résidus forestiers en plaquettes :				
1. 1 tracteur + 1 petit broyeur + 2 hommes	60 ± 26	2,3 ± 1,0	0,29 ± 0,3	22 ± 3
2. 1 tracteur + 1 broyeur + 1 grappin + 1 homme	48 ± 21	1,0 ± 0,3	0,44 ± 0,7	32 ± 6
3. 2 tracteurs + 1 gros broyeur + 2 hommes	45 ± 12	0,9 ± 0,2	0,67 ± 0,3	50 ± 20
4. 1 machine forestière+ 1 gros broyeur + 1 homme	47 ± 19	0,4 ± 0,1	n.a.	n.a.
5. 2 machines forest. + 1 gros broyeur + 2 hommes	51 ± 13	0,6 ± 0,2	n.a.	n.a.
6. 1 machine forest. + 1 broyeur fixe + 2 hommes	42 ± 18	0,5 ± 0,2	n.a.	n.a.
Broyage fixe de déchets de bois industriels :				
1. moins que 500 tms/a	90 ± 25	1,4 ± 0,7	0,75 ± 0,2	29 ± 13
2. 1,000-2,000 tms/a	50 ± 20	0,7 ± 0,5	0,6 ± 0,3	20 ± 10
3. 3,000-5,000 tms/a	23 ± 7	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,2	13 ± 6
4. plus de 10,000 tms/a	10 ± 1	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,1	7 ± 2
Transport des plaquettes de bois :				
transport local par tracteur et remorque (20 km)	4,2 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,17 ± 0,01	10 ± 1
transport régional par camion (75 km)	8 ± 4	0,6 ± 0,4	0,18 ± 0,11	11 ± 7
transport international par camion (300 km)	32 ± 17	0,8 ± 0,3	0,74 ± 0,44	46 ± 28
Stockage des plaquettes de bois (6 mois) :				
stockage naturel sous abri	0,1 ± 0,1	0	0	0
stockage ventilé en silo	6,5 ± 2,5	0	1,8 ± 0,2	65 ± 10
stockage en silo séché et ventilé	30 ± 7	0	2,7 ± 0,1	205 ± 10

Table 4		Coûts de production EUR/tms	Main d'œuvre Heures/tms	Consommation d'énergie GJ/tms	Emissions de CO ₂ kgCO ₂ /tms
F1	Rémanents de forêts feuillues récoltées après 100 jours avec un petit broyeur mobile + transport local vers un utilisateur local + stockage des chips (max. 180 jours).	70 ± 26	2,6 ± 1,0	0,38 ± 0,04	27 ± 3
F2	Rémanents de forêts feuillues récoltées après 100 jours avec un broyeur de taille moyenne + transport local vers un utilisateur local + stockage des chips (max. 180 jours).	55 ± 11	1,1 ± 0,4	0,57 ± 0,08	40 ± 6
F3	Rémanents de forêts feuillues récoltées après 100 jours avec un broyeur de taille moyenne + transport régional vers un utilisateur régional + stockage des chips (max. 180 jours).	56 ± 13	1,6 ± 0,8	0,54 ± 0,13	38 ± 9
F4	Rémanents de forêts résineuses récoltées immédiatement après la coupe avec une grosse machine forestière + transport régional + stockage ventilé pendant 30 jours.	72 ± 17	2,2 ± 1,6	1,84 ± 0,53	185 ± 44
F5	Rémanents de forêts résineuses + récolte immédiatement après la coupe avec une grosse machine forestière + transport régional + séchage jusqu'à 15% et stockage pendant 180 jours.	73 ± 17	2,2 ± 1,6	2,25 ± 0,86	162 ± 63
C1	Culture peu intensive de TtCR + récolte en tiges + stockage des tiges sur le bord du champ (max. 180 jours) + broyage des tiges + transport local.	159 ± 43	3,1 ± 0,2	1,06 ± 0,15	77 ± 11
C2	Culture assez intensive de TtCR + récolte en plaquettes + transport local + stockage des plaquettes sous abri (max. 180 jours).	148 ± 38	1,0 ± 0,8	1,84 ± 0,45	133 ± 32
C3	Culture très intensive de TtCR + récolte en ballots + transport local + broyage des ballots en plaquettes + stockage des plaquettes sous abri (max. 180 jours).	194 ± 54	3,8 ± 1,5	1,55 ± 0,36	111 ± 25
C4	Culture très intensive de TtCR + récolte en plaquettes + transport local + stockage sous abri (max. 180 jours).	143 ± 41	3,8 ± 1,5	1,50 ± 0,36	107 ± 25
W1	Déchets industriels de menuiserie, stockage en plaquettes et utilisation locale.	7 ± 0,2	0	0,21 ± 0,07	15 ± 5
W2	Déchets industriels broyés en menuiseries, transport régional, broyage fin et densification en granulés ou en briquettes.	142 ± 20	6,2 ± 0,9	2,06 ± 0,16	123 ± 10

5.3. Production d'énergie à partir de bois

GEB a classé les technologies bois-énergie par type d'usage et par niveau de puissance : le chauffage domestique, le chauffage collectif et/ou la production d'électricité et la production centralisée d'électricité.

En ce qui concerne le chauffage domestique ($<100 \text{ kW}_{\text{th}}$), 4 technologies différentes sont déjà disponibles : les poêles à bûches, les poêles à granulés, les chaudières à bûches, les chaudières à plaquettes ou à granulés. En plus, 2 nouvelles technologies pourraient apparaître d'ici 2010 : les chaudières à bois couplés à un moteur Stirling et les micro-groupes gazo-électrogènes.

Les poêles à bois sont en fait la technologie bois-énergie la plus utilisées en Belgique par les ménages. Les rendements énergétiques (25%-60%) et les émissions de gaz polluants rejetés à l'atmosphère ($200\text{-}2\,000 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{MJ}_{\text{comb}}$, $150\text{-}900 \text{ mg}_{\text{particules}}/\text{MJ}_{\text{comb}}$) se sont fortement améliorés

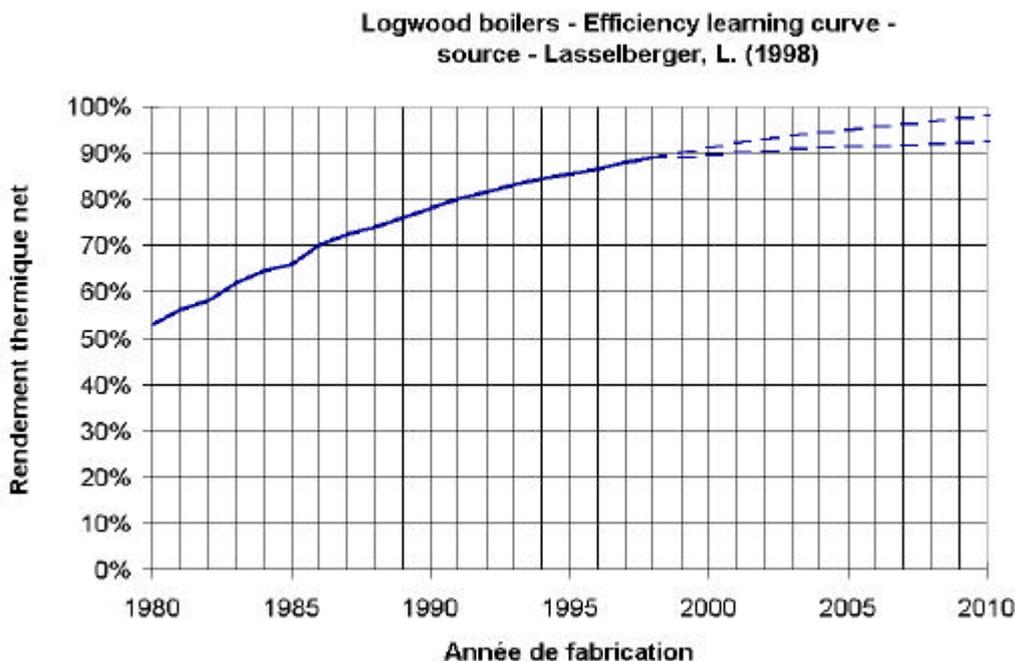


Figure 7 – Courbe d'apprentissage décrivant l'amélioration du rendement des chaudières à bûches (tracé par GEB à partir de données collectées par Lasselberger in 1998).

depuis les années 70 (cfr. Figure 7). Les coûts d'investissement des poêles à bois modernes sont très fortement influencés par le type de poêle et son design, ils se situent entre 100 et 300 EUR/kW_{th} (poêles classiques), et entre 400 et 600 EUR/kW_{th} (poêles céramiques) [Karlsvik et Sonju, 1991, Senf, 1996, Strehler, 1998 and FEEDS, 1998].

Les chaudières à bois sont de plus en plus souvent installées dans les pays du Nord et de l'Est de l'Europe (en Autriche, il y a eut 15 000 nouvelles chaudières à bois installées uniquement durant l'année 1996, Lasselberger et al. 1998). Une amélioration importante a été faite sur le rendement de ces chaudières (70%-90%) et sur les émissions à l'atmosphère de polluants ($50\text{-}1\,000 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{MJ}_{\text{comb}}$, $50\text{-}350 \text{ mg}_{\text{NO}_x}/\text{MJ}_{\text{comb}}$ et $20\text{-}100 \text{ mg}_{\text{particules}}/\text{MJ}_{\text{comb}}$). Les investissements dépendent du type de chaudière et du niveau de puissance : 200-400 EUR/kW_{th} pour les chaudières à bûches avec le réservoir de stockage d'eau chaude ($20\text{-}50 \text{ kW}_{\text{th}}$), 300-700 EUR/kW_{th} pour une chaudière automatique à plaquettes ($20\text{-}50 \text{ kW}_{\text{th}}$).

La production d'électricité à la maison est au tout début de son développement. GEB estime que les technologies de cogénération seront de plus en plus disponibles dans le futur. Deux technologies différentes ont été analysées : (1) la combinaison d'une chaudière à bois et d'un moteur Stirling et (2) la combinaison d'un gazogène à bois et d'un groupe de cogénération à gaz. Ces systèmes ne sont pas encore disponibles commercialement mais la démonstration de la réalisation technique est presque faite. Les rendements globaux pourraient être aussi haut que 70%-90% dont 10%-25% pour la production d'électricité et 45%-80% sous forme de chaleur. Le niveau de puissance est de 5-50 kW_e et 10-200 kW_{th}. Les plaquettes de bois, les granulés ou les bûches pourront être utilisés.

Pour le chauffage collectif (<10 MW_{th}), différentes technologies sont disponibles : les chaudières à bois naturel, les chaudières à bois contaminé, éventuellement couplés à des cycles de cogénération à vapeur et les groupes gazo-électrogènes de cogénération.

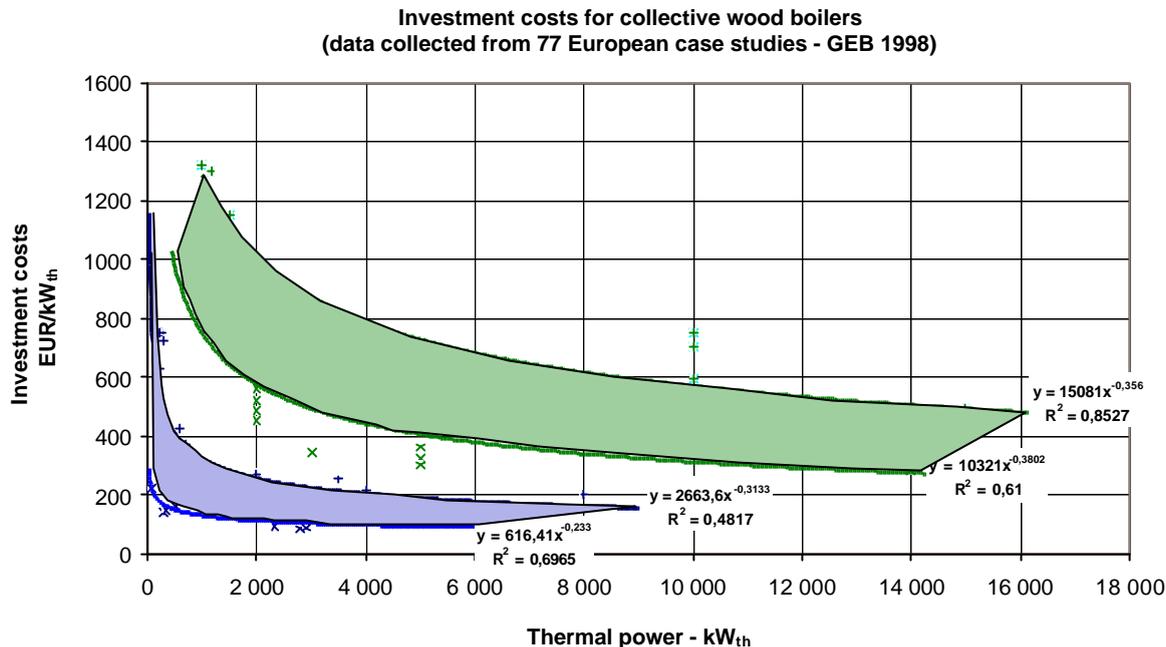


Figure 8 - Evolution avec la taille des coûts d'investissement spécifiques des chaudières à bois collectives (GEB).

Les chaudières à bois collectives peuvent être prévues pour le bois naturel ou pour le bois contaminé. Les chaudières à bois naturel sont 3 à 5 fois meilleur marché que celles qui sont adaptées pour brûler du bois contaminé. Ceci résulte du fait qu'elles ne nécessitent pas un investissement important pour le nettoyage des fumées. Les coûts d'investissement spécifiques (Figure 8) sont très fortement influencés par la taille de l'installation (200-600 EUR/kW_{th} pour une chaudière dont la puissance est inférieure à 1 MW_{th}, 150-200 EUR/kW_{th} pour une chaudière dont la taille est supérieure à 2 MW_{th}, cfr. Figure 8, la zone bleue et 400-1 000 EUR/kW_{th} pour des chaudières dans la gamme de 2-5 MW_{th} et 300-650 pour une taille supérieure à 5 MW_{th}). Le rendement thermique se situe entre 70% et 105% (pour les chaudières à condensation) avec une valeur moyenne autour de 85%. Quelques chaudières à bois de cette taille peuvent être intégrées dans un cycle à vapeur conçu pour la cogénération. Mais ceci est rarement fait pour un niveau de puissance de la chaudière inférieure à 10 MW_{th} (cfr. ci-dessous).

Les groupes gazo-électrogènes de cogénération sont maintenant commercialement disponibles sur le marché européen. Ce concept combine un gazogène à lit fixe et un moteur à combustion interne couplé à un alternateur et muni d'échangeurs pour récupérer la chaleur disponible sur le moteur. Les coûts d'investissement sont relativement élevés (2 500-5 000 EUR/kW_e). Le rendement total peut atteindre 70-90% si la chaleur est bien récupérée : les rendements électriques sont situés entre 18 et 27% et les rendements thermiques entre 40% et 70%. Les émissions de polluants rejetés à l'atmosphère sont assez faibles : 50 à 250 mg_{CO}/MJ_{comb} pour le monoxyde de carbone et 10 mg_{NO_x}/MJ_{comb} pour les oxydes d'azote.

Pour la production centralisée d'électricité (> 10 MW_e), les technologies actuellement disponibles sont : les cycles à vapeur, les cycles combinés intégrant la gazéification de la biomasse et la co-combustion de bois et de charbon. Les cycles à vapeur d'une taille suffisante (entre 10 MW_e et 50 MW_e) obtiennent un rendement électrique de 24% à 40% avec un effet de taille important. Pour un niveau de puissance supérieur à 10 MW_e, les coûts d'investissement se situent entre 1 500 et 2 700 EUR/kW_e (Figure 9).

Les centrales électriques à cycles combinés gaz-vapeur intégrant une pré-gazéification du bois sont encore dans une phase de démonstration technique. Les rendements électriques atteindront 35% à 40% pour la gamme de puissance de 25-30 MW_e. Les coûts d'investissement sont estimés entre 1 000 et 2 700 EUR/kW_e pour un niveau de puissance supérieur à 10 MW_e.

La solution la meilleur marché pour la production d'électricité centralisée reste la conversion des centrales actuelles au charbon à la co-combustion de bois et de charbon. Ceci a déjà été fait en Amérique du Nord et en Europe du Nord dans une douzaine de centrales électriques. Pour un investissement très faible en comparaison aux autres solutions (entre 100 et 500 EUR/kW_e), le producteur d'électricité peut facilement convertir une centrale à charbon existante en une centrale électrique alimentée partiellement au bois.

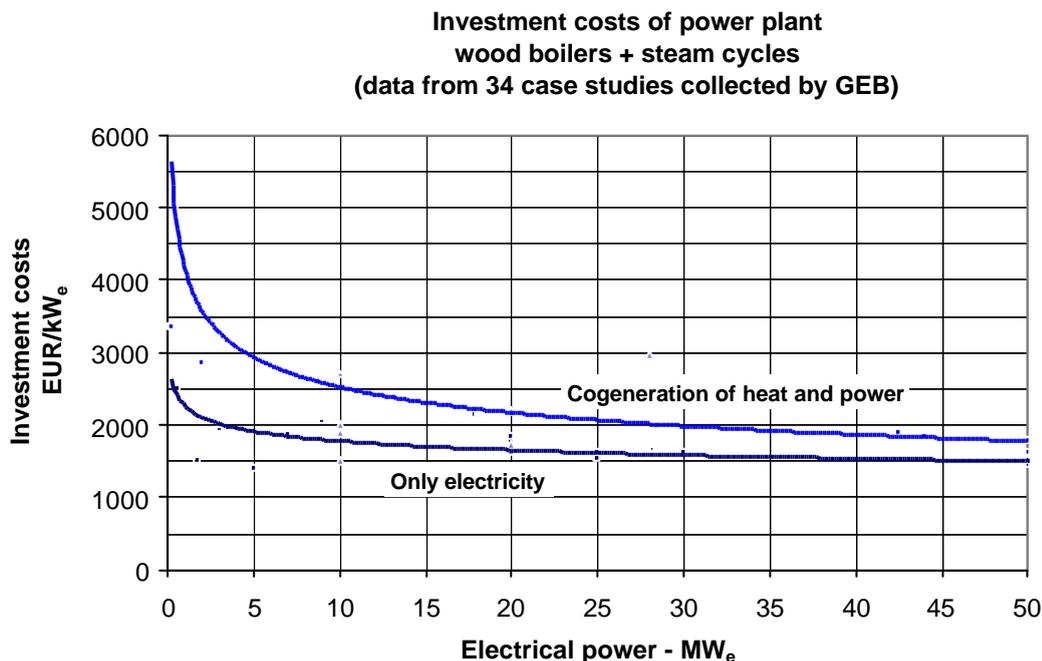


Figure 9 - Evolution des coûts d'investissement spécifiques des centrales électriques à cycle vapeur alimentées au bois en fonction de la taille de la centrale (GEB).

6. Les contributions du bois-énergie au développement soutenable

6.1. Le bois-énergie réduit l'effet de serre

Pour chaque type de demande énergétique satisfaite par le bois-énergie, GEB a comparé les émissions de gaz à effet de serre du système bois-énergie à celles du système classique à énergie fossile ou atomique. Le chauffage au bois a été comparé au chauffage au mazout ou au gaz, en tenant compte du cycle de vie complet de l'approvisionnement en combustible (341 kgCO₂/MWh_{heat}). Finalement, après avoir évalué les émissions de CO₂ produites au cours de la production d'électricité à partir du bois, GEB y a soustrait la quantité de CO₂ d'origine fossile qui serait émise dans le cas d'une centrale électrique de référence. Le choix de la référence est très important. Pour le faire, nous devons répondre à la question : si la centrale électrique à bois n'était pas construite, comment l'énergie utilisée serait-elle produite ? Dans une vieille centrale à charbon, dans un mélange de centrales électriques correspondant au parc des centrales électriques belges ou bien dans une toute nouvelle centrale TGV à gaz ?

Certains experts argumentent qu'il faut comparer le nouvel investissement avec un autre nouvel investissement (dans ce cas, la référence est alors une nouvelle centrale à gaz). Mais rien n'indique que si la centrale électrique à bois n'avait pas été construite, le producteur d'électricité aurait utilisé l'argent investi pour construire une nouvelle centrale à gaz. Considérant les incertitudes de la libéralisation du marché et le faible coût du charbon, il pourrait très bien décider de reporter ce nouvel investissement (par exemple pendant 5 ans) et d'utiliser encore des vieilles centrales à charbon. D'autres experts argumentent que la construction de nouvelles centrales électriques à bois a conduit à fermer les plus vieilles centrales électriques du parc électrique. Dans ce cas, il faudrait prendre comme centrale de référence la plus vieille centrale. Mais rien n'indique si cette plus vieille centrale électrique n'aurait pas été remplacée par une nouvelle au gaz ou au charbon. Finalement, nous pourrions choisir comme centrale de référence une centrale électrique moyenne rejetant les émissions de CO₂ produit en moyenne par l'ensemble des centrales électriques installées en Belgique. Mais une fois encore, ce choix apparaît une hypothèse discutable à partir du moment où les réseaux électriques nationaux sont de plus en plus interconnectés entre eux en Europe. Pour résoudre ce problème relativement complexe, GEB a considéré différents cas. L'électricité produite à partir du bois a été comparée à la plus vieille centrale électrique belge ou bien à la moyenne du parc électrique ou encore à la meilleure à la meilleure turbine à gaz disponible pour la production d'électricité, en tenant compte du cycle de vie complet du combustible fossile utilisé pour la production d'électricité (950, 340 ou 490 kgCO₂/MWh_{elec}).

GEB a conclu que, même en tenant compte de la consommation de combustibles fossiles pour la préparation du bois, les filières bois-énergie réduisent fortement les émissions de gaz à effet de serre.

1. La production des combustibles à partir des ressources bois émet entre 10 et 230 kgCO₂/tms, ce qui représente 0,5-12,8 kgCO₂/GJ_{comb} alors que la production des combustibles classiques à partir des ressources fossiles émet entre 4,4-18,7 kgCO₂/GJ_{comb} pour les produits pétroliers, 9-22,5 kgCO₂/GJ_{comb} pour le gaz naturel et 1,0-29,8 kgCO₂/GJ_{comb} pour le charbon. Nous concluons que le cycle de production du combustible bois, a un très faible impact sur le problème de l'effet de serre. En tenant compte des émissions directes lors de la combustion, le bois montre alors tout son intérêt : 0 kgCO₂/GJ_{comb} pour les combustibles issus du bois, 74 kgCO₂/GJ_{comb} pour les produits pétroliers, 56 kgCO₂/GJ_{comb} pour le gaz naturel et 94 kgCO₂/GJ_{comb} pour le charbon. En brûlant le bois, le CO₂ émis dans l'atmosphère est exactement la même quantité qui a été au préalable capté par l'arbre durant la photosynthèse. Ces combustibles sont donc des combustibles neutres en carbone. Leur utilisation ne perturbe pas le cycle naturel du carbone puisque s'ils n'avaient pas été brûlés, le carbone aurait quand même été rejeté à l'atmosphère sous l'effet de la décomposition naturelle du bois. En conclusion, sur le cycle de vie complet des combustibles, le bois émet 10 à 17 fois moins de CO₂ que les combustibles d'origine fossile (cfr. Figure 10).

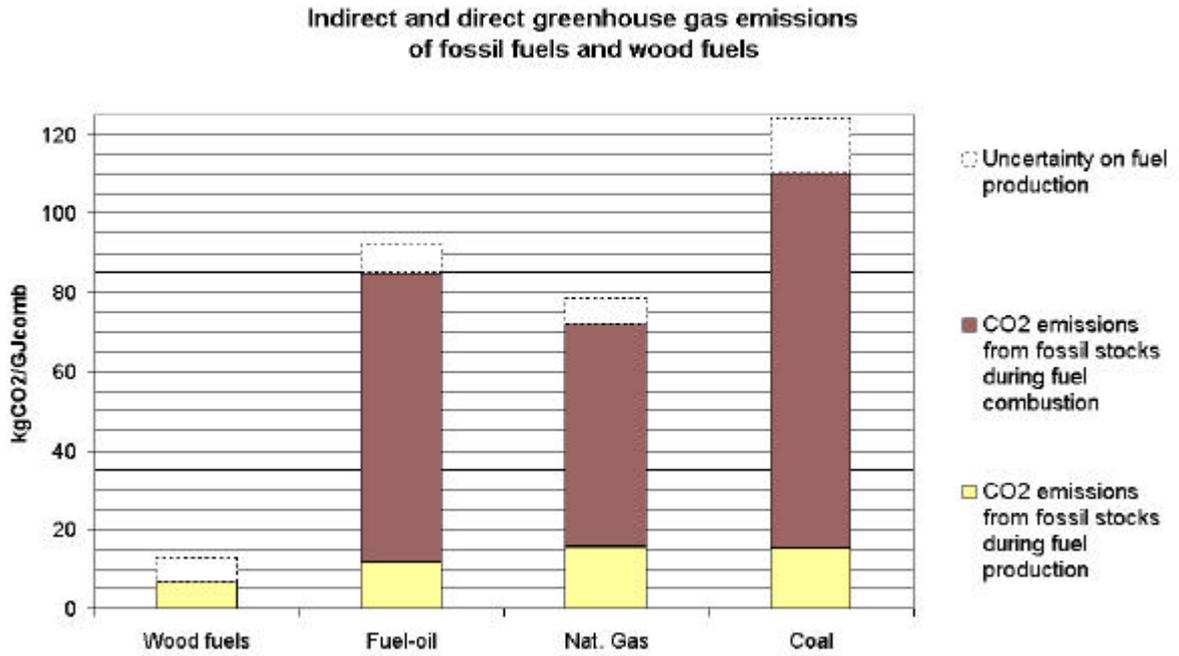


Figure 10 - Emissions of greenhouse gases of main fuels (GEB).

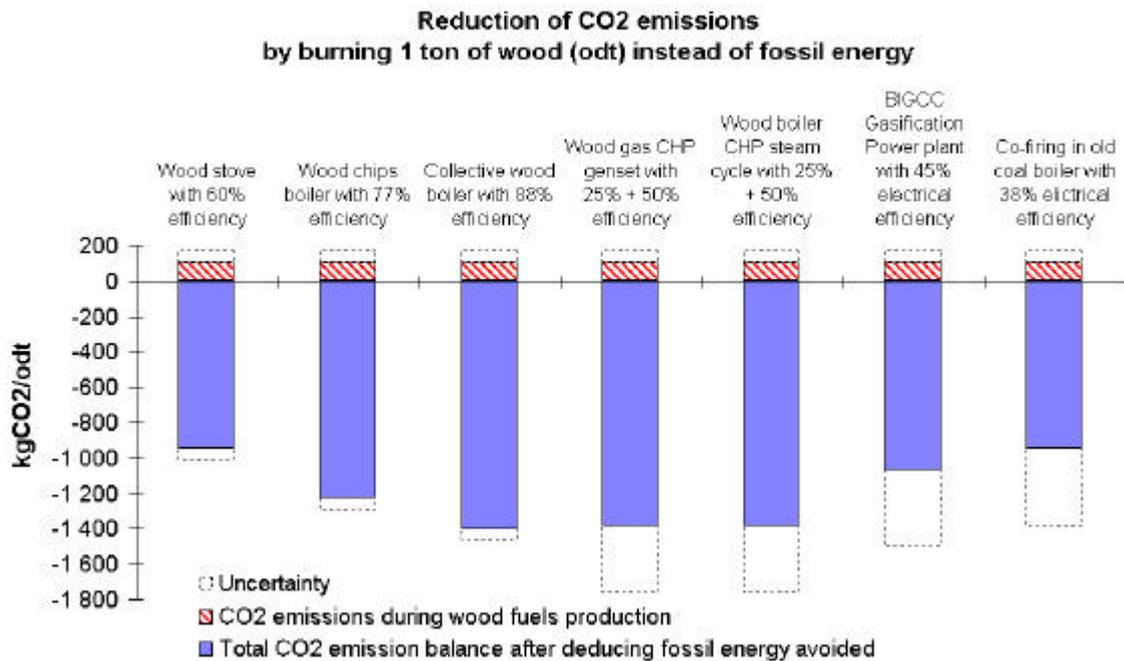


Figure 11 - Réduction des émissions de gaz à effet de serre par substitution des combustibles fossiles par du bois (GEB).

2. GEB a évalué la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui résulterait en Belgique du remplacement progressif des technologies de production d'énergie à partir de ressources fossiles par des technologies de production d'énergie à partir du bois. Suivant les hypothèses choisies (cfr. ci-dessus), les résultats varient entre 750 et 1 700 kgCO₂ évité par tonne de bois consommé comme source d'énergie. En tenant compte que les ressources en bois-énergie ont été estimées à environ 2 millions de tonnes par an en Belgique (340 000 dans les forêts, 970 000 dans l'industrie et 710 000 dans l'agriculture), GEB a estimé qu'entre 1,5 et 3,4 millions de tonnes de CO₂ pourrait être évitées en développant l'utilisation du bois-énergie en Belgique (c'est-à-dire

entre 1,2% et 2,7% du total des émissions belges d'équivalent CO₂ en 1990²). Pour chaque nouveau projet d'utilisation du bois-énergie, la réduction des émissions de CO₂ dépendra de l'efficacité réelle de la technologie de conversion, de la consommation réelle d'énergie fossile pour la production du combustible et du type d'énergie qui est remplacée par la nouvelle filière. Par exemple, la Figure 11 compare la réduction des émissions de CO₂ lors de la transformation de 1 tonne de bois en énergie suivant différentes filières. L'importante incertitude pour les technologies de production d'électricité provient des différents choix possibles pour la centrale de référence (cfr. ci dessus).

Les conclusions de GEB sont que les filières bois-énergie réduisent drastiquement les émissions de CO₂. Pour profiter au mieux des ressources de bois disponibles en Belgique, il faut installer des technologies à haut rendement thermique (par exemple en développant le chauffage collectif plus performant que le chauffage individuel) ou en développant la cogénération d'électricité et de chaleur (par exemple via des groupes gazo-électrogènes ou des cycles à vapeur).

6.2. La création d'emplois dans les filières de production d'énergie à partir de bois

Le CEE a estimé l'emploi direct et indirect nécessaire à la production de bois-énergie. Cela a été principalement fait sur base des données du CRA, de ECOP et GEB. Le CEE a analysé en profondeur la quantité d'emplois nécessaire pour la fabrication des chaudières à bois et pour le transport des combustibles issus du bois. Finalement, le CEE a tenu compte des emplois qui seront remplacés par l'élimination des énergies fossiles par le bois énergie. Ce calcul a été fait sur base des statistiques nationales belges.

Le CEE a estimé les emplois nécessaires pour produire 1 000 TJ de bois-énergie entre 24-350 hommes-an (cfr. Table 3). Ceci peut être comparé aux 8 hommes-an nécessaires pour la production de charbon [Hektor, 1999]. En appliquant les estimations du CEE aux ressources en bois disponibles en Belgique, GEB a dessiné la courbe de création d'emplois lors de la production des combustibles issus du bois (Figure12). Il apparaît que les nouveaux emplois seront seulement créés lorsque la demande en bois-énergie sera suffisamment importante pour que les ressources forestières et agricoles soient exploitées. La récupération des déchets de bois industriel, qui se développera en premier lieu, ne crée pas beaucoup d'emplois pour la chaîne d'alimentation en bois. En Belgique, la création d'emplois pour récupérer la totalité du potentiel disponible est estimée entre 2 200 et 3 000 emplois.

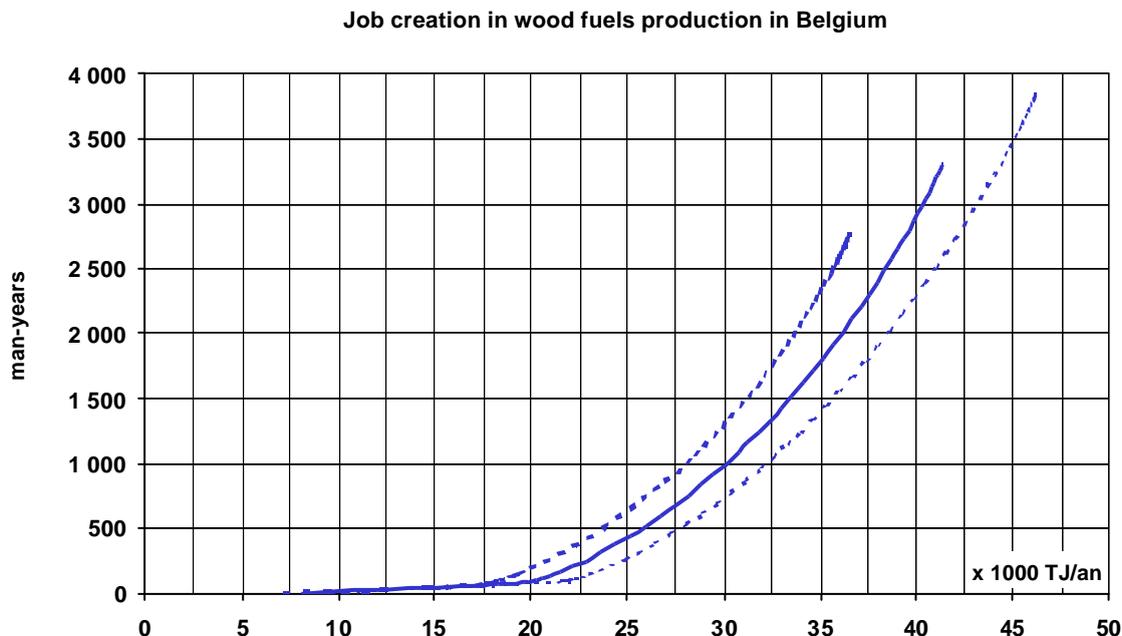


Figure 12 - Estimation des emplois créés pour produire le bois-énergie en Belgique (dessiné par GEB sur base des données de CEE).

² Estimated by the Bureau Fédéral du Plan to 126.1 millions tons of equivalent CO₂ (BFP, 1996).

6.3. La rentabilité de la production d'énergie à partir de bois

Le CEE a estimé la rentabilité des technologies bois-énergie. Pour chaque technologie identifiée, le CEE a calculé le taux de rentabilité interne, le coût de production et la valeur actualisée nette (VAN).

Une comparaison entre 14 technologies a été faite. Pour le chauffage domestique, il apparaît que le bois-énergie devient rentable si le prix du combustible est inférieur à 90-125 EUR/tms. Pour la cogénération à petite échelle ou le chauffage collectif ($<10 \text{ MW}_{\text{th}}$), le coût d'approvisionnement du bois propre doit être inférieur à 140-160 EUR/tms. Le coût de bois contaminé doit lui être inférieur à 15 EUR/tms. Pour la production d'électricité centralisée, même si le coût du bois était aussi élevé que 125-260 EUR/tms, les centrales électriques pourraient être rentables.

GEB considère que ces résultats doivent être considérés très prudemment à cause du choix des hypothèses. En effet, le CEE suppose que l'électricité et la chaleur produite seront toujours vendues au même prix. Ces prix ont été fixés à un niveau très élevé de 148 EUR/MWh_{el} et 43 EUR/MWh_{th}. Une deuxième hypothèse importante est la durée annuelle d'utilisation des technologies. Le CEE a choisi une durée identique de 4000 heures par an pour toutes les technologies. Cette hypothèse ne colle pas bien à la réalité mais il est impossible de représenter le grand nombre de cas réel du point de vue global. La troisième hypothèse est le choix du taux d'intérêt à 6,75%. Enfin, la quatrième hypothèse est la durée de vie de chaque technologie.

Pour améliorer l'analyse future de projet au cas par cas, le CEE a rendu possible la variation de ces paramètres.

7. Modélisation de la croissance des taillis de peuplier

7.1. Objectifs, hypothèses et limites

L'objectif de PLECO, est de simuler, par une approche mathématique, l'effet de différents traitements sur la production (en terme de quantité de biomasse) de différents clones de peupliers.

D'une façon globale, l'observation expérimentale a permis d'évaluer l'évolution, au cours du temps, de la quantité de biomasse récoltable accumulée par une culture en taillis de 17 clones de peupliers (*Populus* spp.) Cependant, un tel suivi expérimental présente tout de même trois principales limites :

- a. L'estimation de la quantité de biomasse récoltable au cours du temps, par prélèvement d'organes (tiges entières), ne peut être réalisée qu'à la fin de chaque saison de croissance et sur un nombre restreint d'échantillons.
- b. La surface des parcelles expérimentales étant restreinte, un prélèvement abusif d'organes ou de plantes entières (donc destructif) modifie la structure du taillis donc, directement, le modèle de développement architectural que nous avons étudié.
- c. Les valeurs de biomasse récoltable ainsi estimées, accumulée dans les parties aériennes des arbres, sont exclusivement liées aux conditions i) culturelles (densité de population, niveau minéral non limitant...), ii) climatiques (pluviométrie, somme de température, d'éclairement...) et iii) épidémiologique (rouille...) du site expérimental de Boom.

Dans le cadre de notre objectif, à partir d'une base de données d'observations expérimentales et d'outils mathématiques existants (tâches 1-2), nous avons concentré notre effort sur le développement d'un modèle mathématique (tâche 3), global et souple, pour simuler, tout au long d'une ou de plusieurs saisons de croissance, l'accumulation de la biomasse récoltable pour :

- a. Différents clones de peupliers ;
- b. Un système de culture présentant des conditions culturelles et climatiques variables.

En règle générale, le développement et la croissance de nouveaux organes (bourgeons, branches et feuilles), pour un couvert végétal forestier, sont principalement déterminés par le niveau local de l'activité photosynthétique (fixation du carbone) ; étant eux-mêmes principalement déterminés par le niveau local d'éclairement. En effet, comme elle détermine l'efficacité d'interception du rayonnement lumineux, c'est la structure du couvert végétal qui conditionne la production de biomasse.

Pour comprendre et prédire la productivité d'une culture il a donc été nécessaire d'obtenir le maximum d'informations concernant les interactions entre le développement morphologique d'un taillis (développement architectural) et les processus physiologiques au sein de ce taillis (photosynthèse).

Nous avons donc orienté notre travail vers une modélisation fonctionnelle de la croissance d'individus appartenant à un taillis ; nous conduisant donc à décrire successivement les étapes i) d'acquisition de la ressource (interception de la lumière en fonction de la distribution spatiale des feuilles dans le couvert), ii) d'exploitation de cette ressource (activité photosynthétique) et iii) de répartition du carbone ainsi fixé, pour l'ensemble des individus du taillis.

Cette modélisation de la croissance d'une culture de peupliers en taillis (tâche 3), a été divisée en trois parties :

- a. Une modélisation tridimensionnelle du développement architectural du taillis. La simulation d'un tel modèle nous a apporté l'évolution des dimensions et des localisations dans l'espace, des tiges et des branches.
- b. Une modélisation de l'interception du rayonnement lumineux à l'intérieur du couvert végétal. Nécessaire à la modélisation du niveau de photosynthèse de chaque feuille de ce couvert.
- c. Une modélisation de l'allocation de ce pool de carbone entre les parties récoltables (tiges et branches) et non récoltables (racines, feuilles...). Cette dernière partie étant nécessaire pour le calcul final de la production de carbone au cours du temps.

Un suivi expérimental a donc été entrepris pour obtenir les informations précises (observations non destructives) concernant le développement, la croissance et l'architecture des arbres pour ce modèle de croissance en taillis. Afin de limiter les difficultés nous avons restreint ce travail à :

- trois clones : Hoogvorst (*Populus trichocarpa* x *P. deltoides*), Fritzi Pauley (*P. trichocarpa*) et Wolterson (*P. nigra*),
- une observation détaillée des couverts forestiers pour la troisième saison de croissance (1999),
- des conditions de croissance naturelle (climat et pluviométrie) et non limitantes en fertilisation azotée.

7.2. Choix des outils utilisés pour l'approche mathématique

Caractériser la structure des couverts végétaux est complexe. Appliqués aux peuplements forestiers, les modèles de pénétration du rayonnement simplifient souvent la structure du couvert, en supposant que les feuilles sont aléatoirement réparties dans une ou plusieurs strates homogènes dans un plan horizontal. Notre étude de la structure et de l'interception du rayonnement (au cours de la saison de croissance de 1999) pour trois couverts forestiers de trois clones de peuplier, a confirmé que notre système expérimental répond à une répartition aléatoire des feuilles, de l'azote et donc de l'activité photosynthétique dans l'espace et selon un système stratifié homogène dans un plan horizontal.

7.2.1. Modélisation tridimensionnelle du développement architectural du taillis par le modèle FRACPO.

Le modèle FRACPO (Chen, 1992), développé au Laboratoire d'Ecologie Végétale (UIA -PLECO), est un modèle tridimensionnel pour le peuplier. Il génère une couronne d'arbre au sein d'un peuplement.

Ce modèle est basé sur des règles d'observations expérimentales simplifiées de la croissance de jeunes arbres de peuplier, suivant des pratiques sylvicoles de courtes rotations, en utilisant une approche fractale.

Les tiges et les branches sont considérés comme une structure portant les feuilles. La distribution spatiale des feuilles est, elle, principalement déterminée par la structure et l'architecture des tiges et des branches. Plusieurs caractéristiques concernant les branches ont été mesurées en détail sur de jeunes arbres de peuplier et un modèle a été développé pour simuler cette dynamique de l'architecture de la couronne.

Le développement structural de la couronne est couplé à un sous-modèle foliaire afin de générer et de simuler la distribution spatiale des feuilles. En sortie, cette simulation temporelle de la structure du couvert forestier [Figure 1] décrit précisément l'emplacement tridimensionnel de chaque feuille ainsi que leurs surfaces respectives. Ces données sont ensuite utilisées pour le calcul de l'indice foliaire (LAI). La description du couvert forestier constitue une grande partie des données nécessaires à la modélisation de l'interception du rayonnement lumineux à l'intérieur de la canopée.

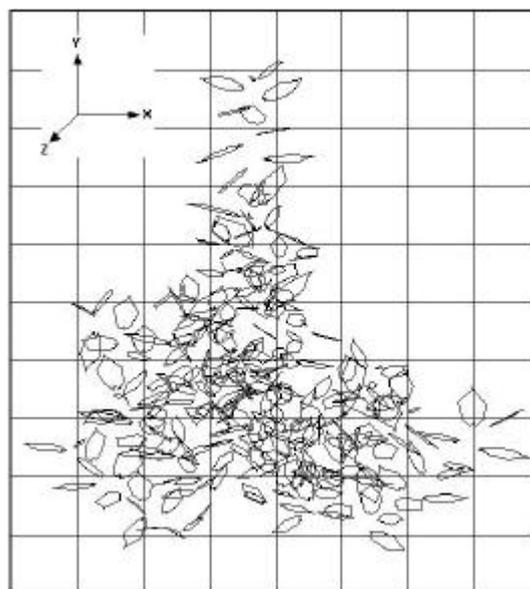


Figure 0 - Représentation tridimensionnelle de la distribution du feuillage, d'une tige de peuplier, par le modèle FRACPO.

7.2.2. Modélisation de l'interception du rayonnement lumineux à l'intérieur du couvert végétal par le modèle RATP.

Le modèle RATP (Sinoquet et Leroux, sous presse), développé au Laboratoire de Physiologie Intégrée de l'Arbre Fruitier (INRA - France), est un modèle tridimensionnel de transfert radiatif. Ce modèle calcule l'interception du rayonnement lumineux et la photosynthèse de croissance d'un couvert d'une culture d'arbres en rangs.

A partir des paramètres de sortie du modèle FRACPO [Figure 1.], l'espace occupé par le feuillage du couvert est divisé en cellules suivant plusieurs couches horizontales et verticales selon deux directions horizontales perpendiculaires [Figure 2.].

Chaque cellule peut être vide ou contenir une partie du feuillage du couvert. Dans une cellule, la densité de la surface foliaire est alors uniformément redistribuée et la distribution des inclinaisons des feuilles recalculée comme une constante. Ainsi, les variations entre le contenu de cellules adjacentes représentent la distribution spatiale de la surface foliaire du couvert.

Ensuite, pour une direction donnée, plusieurs faisceaux lumineux sont appliqués à ce couvert. La voie d'accès du faisceau est calculée selon de simples considérations géométriques. L'extinction de l'intensité de ce faisceau est calculée à partir des lois de l'interception du rayonnement par les feuilles (propriétés optiques). Ces lois sont appliquées pour chacune des cellules visitées.

Enfin l'équilibre radiatif de ce système est résolu en utilisant une méthode qui nous permet de quantifier la proportion de rayonnement arrêté au niveau de chaque cellule.

Couplé à un sous modèle photosynthétique (Farquhar et al, 1980), utilisant le même principe de découpage du couvert forestier, nous pouvons simuler le niveau de photosynthèse de croissance (assimilation du carbone) global de la canopée et donc l'accumulation de carbone par la culture.

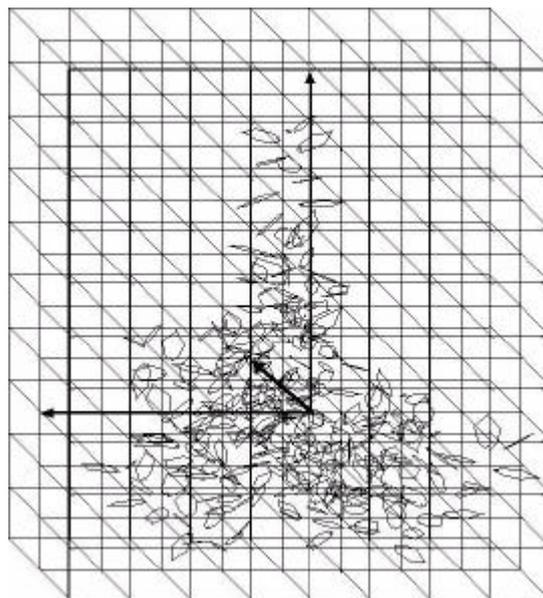


Figure 0 - Représentation tridimensionnelle du découpage, en cellules unitaires, de la distribution du feuillage par le modèle RATP.

7.3. Description des paramètres d'entrées des modèles

Le développement de cette approche mathématique simulant, pour une forêt en taillis de peuplier, l'accumulation de la biomasse récoltable au cours des années, nécessite un grand nombre de paramètres descriptifs de l'évolution de ce couvert forestier au cours du temps. Pour simplifier la présentation des paramètres expérimentaux (obtenus pour la saison de croissance 1999), nous avons décidé de ne détailler que le clone Fritzi Pauley (T)

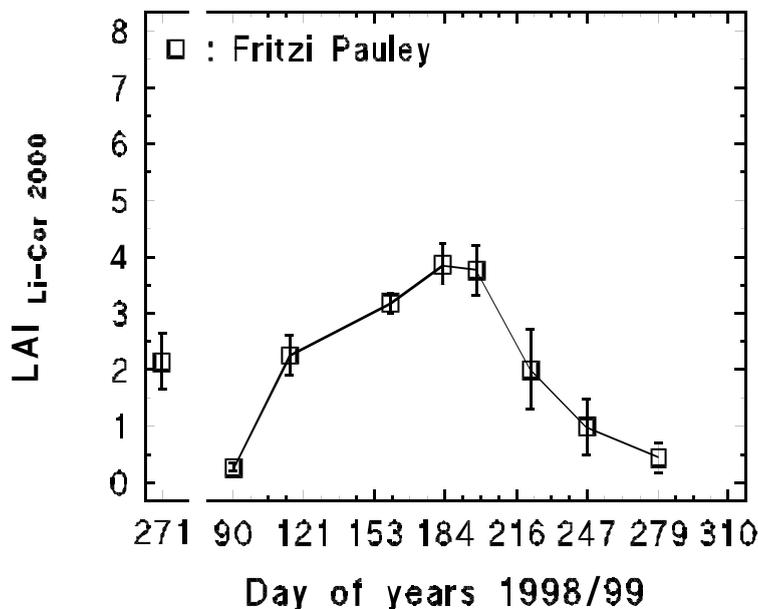


Figure 0 - Evolution moyenne (pour trois parcelles expérimentales) de l'indice foliaire (LAI) d'un couvert forestier (pour le clone Fritzi Pauley) durant la saison de croissance de 1999.

7.3.1. Architecture du couvert du taillis = description de la distribution tridimensionnelle des surfaces foliaire du couvert végétal

Modèle décrit	Paramètres d'entrées	Grandeur	Unité	Source
FRACPO	Distance entre les arbres	150 - 75	cm	Mesuré
	Longueur moyenne de chaque pousse annuelle	Non présenté	cm	Mesuré
	Nombre moyen d'inter-noeuds pour chaque pousse		-	Chen. 1992
	Longueur maximale moyenne des inter-noeuds		mm	Chen. 1992
	Taux d'apparition des branches		%	Chen. 1992
	Nombre de branches sylleptiques	Non présenté	-	Mesuré
	Longueur des branches sylleptiques	Non présenté	cm	Mesuré
	Angle entre la tige et les branches sylleptiques	72 ± 13	°	Mesuré
	Angle de courbature des branches sylleptiques	35 ± 19	°	Mesuré
	Nombre de branches proleptiques		-	Chen. 1992
	Longueur des branches proleptiques		cm	Chen. 1992
	Angle entre la tige et les branches proleptiques	Non présenté	°	Chen. 1992
	Angle de courbature des branches proleptiques	Non présenté	°	Chen. 1992
	Evolution de l'indice foliaire (LAI) au cours de la saison de croissance	Cf. Figure 3.		Mesuré
	Evolution du nombre de feuilles au cours de la saison de croissance	Cf. Figure 4. & 5.		Mesuré
	Longueur maximale des feuilles	290 ± 58	mm	Mesuré
	Largeur maximale des feuilles	166 ± 32	mm	Mesuré
	Longévité maximale des feuilles		Jours	Chen. 1992
Angle moyen entre la branche et le pétiole	25 ± 4	°	Mesuré	
Angle moyen entre le pétiole et la nervure centrale	132 ± 7	°	Mesuré	

Les différents paramètres énoncés ci-dessus sont nécessaires à la validation du modèle FRACPO, pour notre système de croissance en taillis. En effet, nous pouvons, en fonction du temps, valider les paramètres de sortie du modèle par les observations expérimentales obtenus :

Paramètres à valider	Sorties FRACPO	Données expérimentales
Description de l'architecture ligneuse, moyenne, pour une tige	simulé	mesuré
Nombre de feuilles par tige / par parcelle	simulé / simulé	mesuré / calculé
Distribution des surfaces foliaires par tige / par parcelle	simulé / simulé	mesuré / calculé
Distribution des angles d'inclinaisons des limbes	simulé	mesuré
Evolution dans le temps de l'indice foliaire (LAI) par parcelle	simulé	mesuré

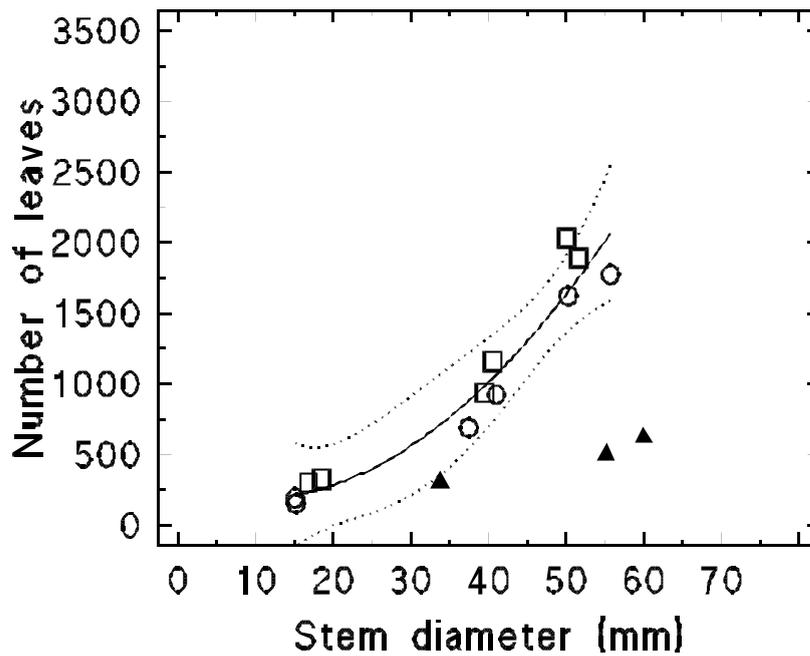


Figure 1 - Evolution du cumul de la surface foliaire, par tige, en fonction du nombre de feuilles. La surface foliaire a été mesurée pour 15 tiges de différents diamètres en ○, Mai (n = 6); □, Juin (n = 6) et ▲, Août (n = 3) 1999

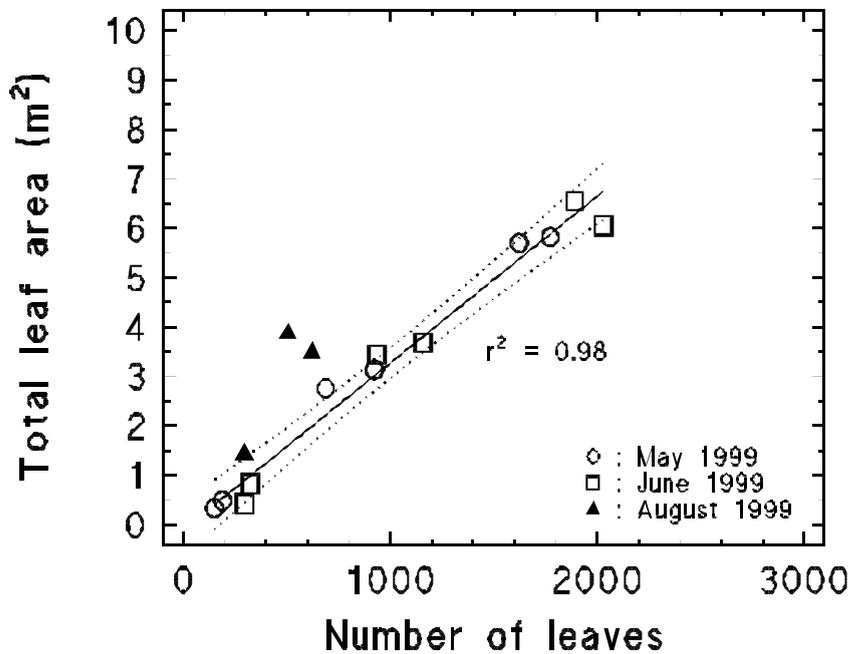


Figure 2 - Evolution du nombre de feuilles, par tige, en fonction du diamètre de la tige à 22 cm du sol. Le nombre de feuilles a été mesuré pour 15 tiges de différents diamètres en ○, Mai (n = 6); □, Juin (n = 6) et ▲, Août (n = 3) 1999

7.3.2. Interception du rayonnement lumineux par le couvert végétal = description de la distribution tridimensionnelle de la photosynthèse

Modèle décrit	Paramètres d'entrées	Grandeur	Unité	Source
RATP	Paramètres climatiques :			
	Température	Non présenté	°C	Mesuré
	Eclairement (PAR) global	Non présenté	$\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Mesuré
	Eclairement (PAR) diffus	Non présenté	$\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Mesuré
	Humidité relative	Non présenté	%	Mesuré
	Pluviométrie	Non présenté	mm	Mesuré
	Paramètres de l'architecture du couvert :			
	Distribution tridimensionnelle de la surface foliaire	Non présenté	$\text{m}^{-2} \text{m}^{-3}$	Mesuré
	Distribution tridimensionnelle de l'azote foliaire	Cf. Figure 6.	$\text{g N m}^{-2} \text{m}^{-3}$	Mesuré
	Propriétés optique des feuilles			???
	Processus physiologiques :			
	Distribution verticale de la vitesse maximale de la RubisCO (V_{cmax})	Cf. Figure 7. & 8.	$\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Mesuré / calculé à 25°C
	Distribution verticale du flux maximal d'électrons (J_{max})	Cf. Figure 7. & 8.	$\mu\text{mol e m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Mesuré / calculé à 25°C
	Distribution verticale de la respiration nocturne (R_d)	Cf. Figure 7. & 8.	$\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Mesuré / calculé à 25°C
	Autres paramètres du modèle photosynthèse			Farquhar <i>et al.</i> 1980

L'activité photosynthétique d'une feuille donnée, pour une localisation donnée dans le couvert forestier, est décrite par ses caractéristiques cinétiques : J_{max} , sa capacité maximale pour la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique; V_{cmax} , sa vitesse maximale pour la fixation du CO_2 atmosphérique et R_d , ses pertes en CO_2 par son activité respiratoire. C'est à partir des courbes de réponse de la photosynthèse à l'éclairement (Figure 7.) et au CO_2 (Figure 8.) et grâce au modèle biochimique de Farquhar, que nous pouvons calculer ces grandeurs.

Ces trois paramètres sont fortement corrélés, positivement (en valeur absolue pour R_d), à la quantité d'azote foliaire (résultats non présentés).

Connaissant alors la distribution tridimensionnelle de la concentration en azote foliaire d'un couvert (Figure 6.) et à partir de la description de la distribution tridimensionnelle des feuilles à l'intérieur du couvert végétal (sortie du modèle FRACPO), le modèle RATP vas alors pouvoir simuler l'activité photosynthétique global de la canopée. Couplé aux paramètres climatiques, nous allons pouvoir ainsi simuler l'accumulation totale de carbone pour une parcelle expérimentale lors d'une ou plusieurs saison de croissance.

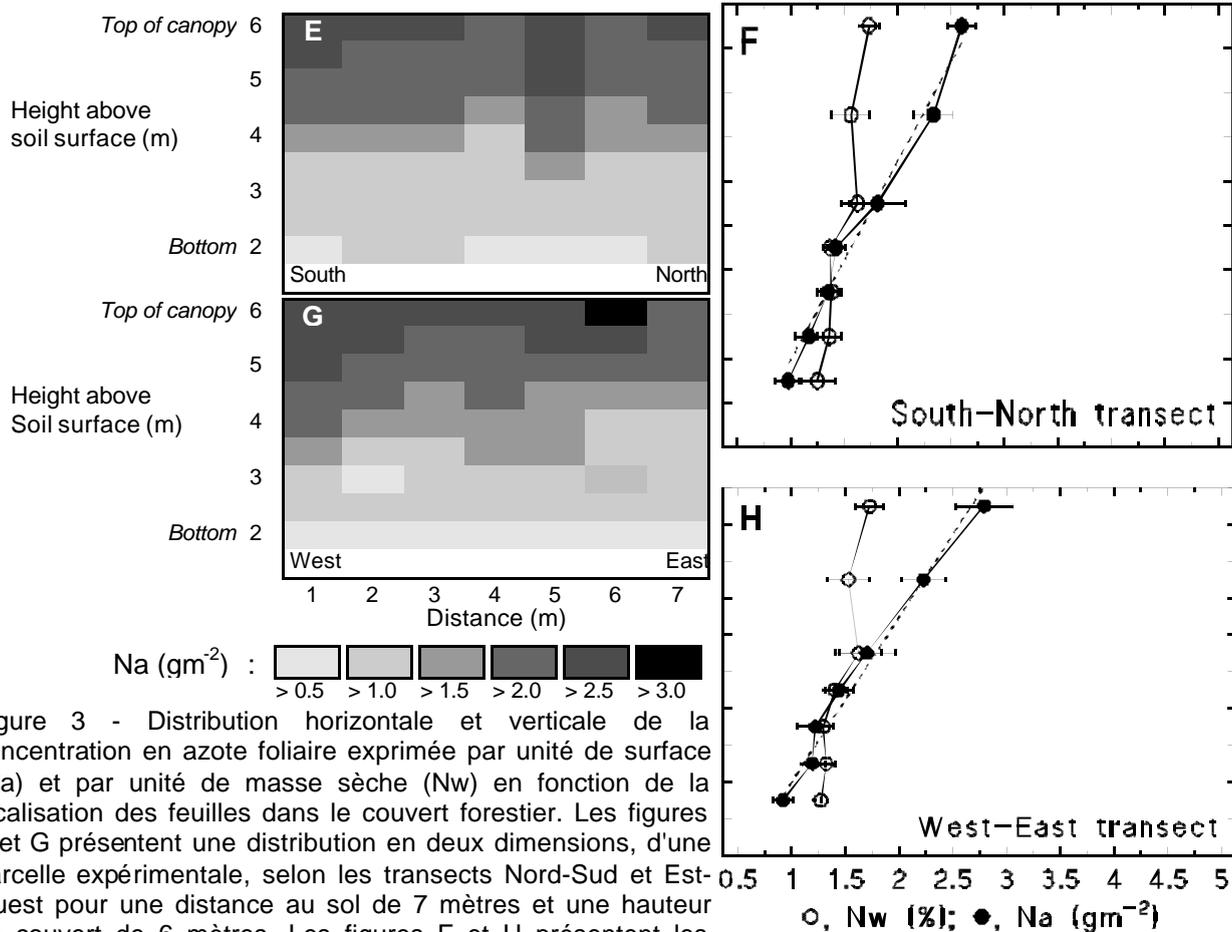


Figure 3 - Distribution horizontale et verticale de la concentration en azote foliaire exprimée par unité de surface (Na) et par unité de masse sèche (Nw) en fonction de la localisation des feuilles dans le couvert forestier. Les figures E et G présentent une distribution en deux dimensions, d'une parcelle expérimentale, selon les transects Nord-Sud et Est-Ouest pour une distance au sol de 7 mètres et une hauteur de couvert de 6 mètres. Les figures F et H présentent les profils verticaux moyens pour Na et Nw.

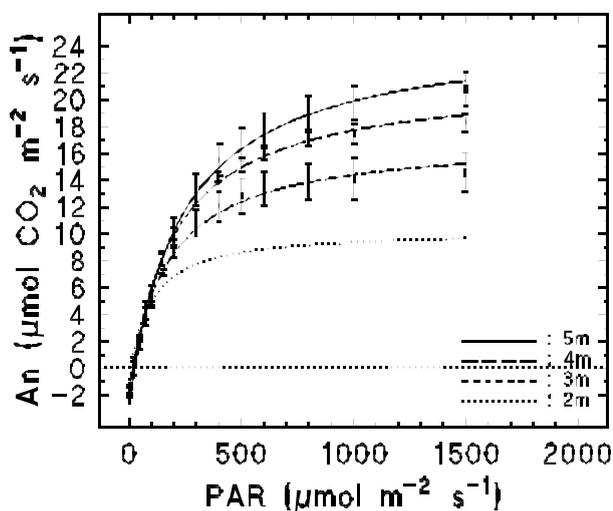


Figure 4 - Assimilation nette moyenne du CO₂ (An) en fonction de la densité du flux de photons (PAR). Mesuré pour des feuilles intactes de peuplier (clone Fritzi Pauley) à différentes hauteurs dans le couvert forestier (2, 3, 4 et 5m). Pour chaque hauteur de couvert, la courbe moyenne a été calculée pour trois feuilles différentes. Ces mesures ont été réalisées, en Août 1999, dans des conditions naturelles : pression partielle de CO₂ et d'O₂ ambiante (≈ 35 Pa et 21 Kpa, respectivement), température de feuille moyenne de 24°C et humidité relative moyenne de l'air de 65%.

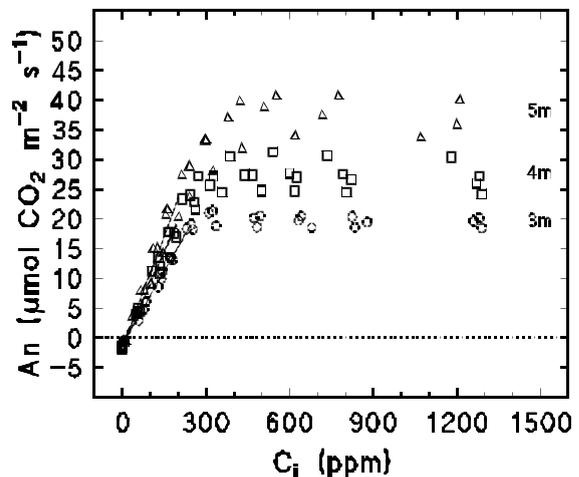


Figure 5 - Assimilation nette moyenne du CO₂ (An) en fonction de la pression partielle de CO₂ intracellulaire (Ci). Mesuré pour des feuilles intactes de peuplier (clone Fritzi Pauley) à différentes hauteurs dans le couvert forestier (3, 4 et 5m). Pour chaque hauteur de couvert, trois feuilles différentes ont été utilisées. Ces mesures ont été réalisées, en Août 1999, dans des conditions naturelles : éclaircissement saturant de 1500 µmoles quanta m⁻² s⁻¹, pression partielle d'O₂ de 2 Kpa, température de feuille moyenne de 24°C et humidité relative moyenne de l'air de 65%.

8. Conseil des décideurs régionaux et fédéraux

Depuis 1999, GEB a contacté et conseillé différents décideurs en Belgique dans le but d'accompagner et de faciliter le développement du bois-énergie en Belgique. Le domaine principal de ces conseils a été celui de la production d'électricité à partir de sources renouvelables. Ce domaine est particulièrement important pour les décideurs dans le contexte de la libéralisation du marché de l'électricité. GEB a analysé en profondeur les différents systèmes politiques envisageables pour favoriser le développement de la production d'électricité renouvelable malgré son coût de production plus élevé. Les principales conclusions sont que (1) les primes ou les quotas doivent prendre en compte la différence des coûts de production des différentes sources d'énergie renouvelables, (2) les primes ou les quotas doivent favoriser les technologies les plus efficaces, (3) les primes et les quotas doivent tenir compte des émissions réelles de gaz à effet de serre des différentes technologies renouvelables (en utilisant par exemple la norme ISO 14040). GEB a proposé différentes solutions qui permettent d'implémenter ces recommandations dans le cadre des nouvelles lois et décrets sur la libéralisation du marché de l'électricité. Certaines de ces recommandations ont été prises en compte par les décideurs politiques (des prix minimums et maximums pour les certificats verts, des objectifs clairs à moyen terme, une pondération des certificats verts distribués en fonction de l'efficacité des technologies utilisées).

10. Évaluation finale & recherches futures

WOODSUSTAIN a réduit les incertitudes sur les sources d'énergies renouvelables en Belgique. Les chiffres obtenus indiquent que le bois-énergie pourrait jouer un rôle important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre en Belgique. Une augmentation de l'utilisation de bois-énergie à un taux de 10% chaque année semble un objectif raisonnablement atteignable en considérant les ressources de bois actuellement gaspillées en Belgique et en considérant le potentiel agricole pour le développement des taillis à courte rotation. En 2010, la production d'énergie à partir de combustibles ligneux pourrait représenter 30,000 TJ/a d'énergie primaire, réduisant les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 1.2 et jusqu'à 3.4 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an et augmentant le nombre d'emplois de 1 500 à 2 500, la plupart seront employés pour des tâches non-spécialisées liées à la production du combustible fossile. La consommation de cette source locale d'énergie réduira les importations d'énergie fossile de 100 à 200 millions d'euros par an. Le développement du bois-énergie à ce rythme demandera 25 à 250 millions d'euros d'investissements nouveaux chaque année.

Cependant, l'objectif ne peut pas être atteint sans une volonté politique fermement marquée. Suivant l'évolution des prix des combustibles fossiles, le bois-énergie peut être ou ne pas être rentable. Les investisseurs doivent donc être rassurés sur l'évolution future des prix de l'énergie ou de la rentabilité de leurs investissements dans le secteur. Différentes mesures pourraient être mises en œuvre (1) maintenir les prix de l'énergie à un niveau qui assure que le bois-énergie devienne compétitif à une plus large échelle (via des taxes environnementales ou une défiscalisation de l'énergie renouvelable), (2) forcer les fournisseurs d'énergie à respecter des quotas de fourniture d'énergie renouvelable (via des systèmes de certificats verts). La production de combustibles ligneux sera plus sûre en aidant le développement de nouvelles cultures de bois sur des terres agricoles et en favorisant la récolte des rémanents forestiers.

Dans le future, ces instruments politiques devront être étudiés plus précisément. En particulier, les systèmes de quotas basés sur les certificats verts devraient être analysés plus en profondeur. Ce système pourrait créer des distorsions importantes entre la production de chaleur et la production d'électricité. Le commerce international de certificats verts est aussi un enjeu majeur qui fait peser un risque important sur les producteurs d'énergie renouvelable. Les autres problèmes importants sont (1) Qui va bénéficier des crédits de CO₂ lié aux accords de Kyoto lors d'un échange de certificat vert ?, (2) Comment créer un système de quotas d'énergie renouvelable pour le secteur de la production de chaleur et le secteur des combustibles de transport ?, (3) Comment éviter la compétition entre l'utilisation de l'énergie de la biomasse et l'utilisation de la biomasse comme matériel ?, (4) Comment la biomasse pourrait être importée en Belgique depuis des ressources infinies (la disponibilité mondiale de biomasse représente 6 fois plus d'énergie que la consommation actuelle de l'humanité) ?

11. Abréviations

kgCO ₂ carbone	la quantité de gaz à effet de serre correspondant à 1 kilogramme de dioxyde de carbone
tms	1 tonne de matière sèche = 1 tonne de bois réellement sec
ha	1 hectare = une surface de 10 000 m ²
tms/a	1 tonne de bois par an
tms/ha	1 tonne de matière sèche par hectare
man-year	1 homme travaillant pendant 1 an
ton	1 tonne de matière
MW _{th}	10 ⁶ Watt de puissance thermique
MW _{el}	10 ⁶ Watt de puissance électrique
MWh	la quantité d'énergie produite (ou consommée) par une machine développant une puissance continue de 10 ⁶ Watt pendant une heure, c'est-à-dire une énergie de 3,6 10 ⁹ Joule
MWh _{heat}	la quantité d'énergie thermique produite (ou consommée) par une machine développant une puissance continue de 10 ⁶ Watt pendant une heure, c'est-à-dire une énergie de 3,6 10 ⁹ Joule
MWh _{elec}	la quantité d'énergie électrique produite (ou consommée) par une machine développant une puissance continue de 10 ⁶ Watt pendant une heure, c'est-à-dire une énergie de 3,6 10 ⁹ Joule

12. Références

- ADEME, 1998, Bois-énergie : le déchetage en forêt, Connaître pour agir, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Laurier, J.P., Pouët, J.C. & Ballaire, P., 1998, 99 p.
- BFP, 1996, Politiques et mesures destinées à modifier les tendances des émissions anthropiques de gaz à effet de serre en Belgique, Bureau Fédéral du Plan, Février 1996, p. 146.
- Bosinventarisatie, 1998, Bosinventarisatie van het Vlaamse Gewest - 1996-1997, Vlaamse Gewest, 1998.
- CdB, 1985, Etude de Faisabilité technico-économique sur le concept de cogénération d'énergie au départ de résidus forestiers, NETT, Janvier 1994.
- Chanrion, P., & Davesne, A., 1992, La valorisation des produits connexes du bois, Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, CTBA, Paris, 1992, 101 p.
- Eco-Conseil, Analyse des ordures ménagères réalisées entre 1992 et 1994 au Grand-Duché de Luxembourg, in Aktioun Recyclingzentren, 1996, 6 p.
- European Parliament, 1993, Une stratégie communautaire globale dans le secteur forestier.
- EWAB, 1996, Pretreatment technologies for energy crops, Energy from Waste and Biomass Programme, NOVEM, EWAB 9525, January 1996, 98 p.
- Fast, 1988, Forestry in the EEC during the eighties, Brussels.
- Hektor, B., 1999, Forest fuels - Rural employment and earnings, unpublished, 1999, 6 p.
- IBGE, 1997, La prévention et la gestion des déchets en Région Bruxelles-Capitale, Les déchets bruxellois en chiffres (1997), Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, Bruxelles, Septembre 1997.
- IEPF, 1994, Guide Biomasse-énergie, collection Etudes et filières, Institut de l'Energie des Pays ayant en Commun l'Usage du Français (IEPF), 1994, 320 p.
- ITER, 1998, Accompagnement de l'étude de marché de l'Atelier de l'Avenir, 22 p.
- Karlsvik, E., Sonju, O.K., *Combustion of wood in stoves, Proceedings of the International Conference on Biomass for energy, industry and environment*, 6th E.C. Conference, held in Athens, 22-26 April 1991, pp 700-706
- Lasselsberger, L., Baumgartner, H., Wörgetter, M., *Biomass furnaces for central heating systems*, in proceedings of the 10th European Biomass for Energy and Industry Conference, held the 8-11 June 1998 in Würzburg, Germany, pp. 220-223.
- Plan wallon des déchets, Horizon 2010 - Plan wallon des déchets, Ministère de l'environnement, des ressources naturelles et de l'agriculture pour la Région wallonne, Janvier 1998, 612 p.
- Rondeux, 1995, Inventaire permanent des ressources ligneuses - période 1994-1997, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 1995.
- Senf, N., *Low Emissions Residential Cordwood Combustion in High Mass Appliances - Recent Research and Results*, Lopez Labs, Shawville, Québec, Combustion Canada '96 Conference, Ottawa, June 5 - 7, 1996.
- Strehler, A., *Main problems with planning, construction and use of wood furnaces for dwellings-experience from consulting activities based on Bavarian research projects*, in proceedings of the 10th European Biomass for Energy and Industry Conference, held the 8-11 June 1998 in Würzburg, Germany, pp. 1344-1347.
- White Paper, 1997, Energy for the future: renewable sources of energy, White paper for a community strategy and action plan, COM(97)599, November 1997, Brussels, 55 p.