

N° d'ordre: 2871

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

Par **Anne PRIEUR**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE: MÉCANIQUE

Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone

Soutenue le: 22 octobre 2004

Après avis de:

M. D. FROELICH, Professeur, ENSAM Chambéry

Rapporteurs

M. P. PERRE, Professeur, ENGREF Nancy

Devant la commission d'examen formée de:

M. J.R. PUIGGALI, Professeur, Université Bordeaux 1

Président

M. M. COMBARNOUS, Professeur, Université Bordeaux 1

M. D. FROELICH, Professeur, ENSAM Chambéry

Mme E. PALOMO del BARRIO, Professeur, Université Bordeaux 1

Rapporteur

M. P. PERRE, Professeur, Université Nancy 1

M. J.L. PEYRON, ICGREF, Docteur, GIP ECOFOR

Invités

M. S. SAYSSET, Docteur, Gaz de France

Avec une pensée pour Papa et pour Jean-Luc

« Croyez-en mon expérience : vous trouverez quelque chose de plus au milieu des bois que dans les livres. Les arbres et les rochers vous enseigneront ce que vous ne pourrez apprendre d'aucun maître »

Bernard de Clairvaux, 1090-1153.

Merci tout d'abord à Jean-Rodolphe PUIGGALI, qui m'a accueillie, en tant que directeur, au sein du LEPT-ENSAM, devenu aujourd'hui TREFLE (Transferts, Écoulements, Fluides, Énergétique), et pour avoir accepté d'assumer la charge de présider le jury. Je tiens également à remercier Daniel FROELICH et Patrick PERRÉ pour avoir rapporté sur cette thèse et participé au jury, pour l'intérêt qu'ils ont exprimé sur ce travail, et pour leurs remarques et suggestions d'améliorations, tant dans leurs rapports écrits qu'à l'occasion de la soutenance. À Elena PALOMO, qui a accepté de faire partie du jury, sincère merci pour sa participation et pour nos discussions générales sur le sujet et pour les échanges plus précis sur la modélisation. Un grand merci enfin à Michel COMBARNOUS, pour m'avoir proposé et pour avoir suivi ce sujet de recherche, motivant mais exigeant pour un jeune chercheur, comme le soulignait Patrick PERRÉ.

J'ai eu la chance de faire ce travail dans le cadre d'une collaboration avec Gaz de France. Au-delà de l'aspect logistique de cette collaboration, j'aimerais remercier les personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler à la Direction de la Recherche, en commençant par mes chefs de projet successifs, Eliška BISTRICKY et Samuel SAYSSET. J'ai également eu beaucoup de plaisir à travailler avec Sophie LE YHUELIC et Luc ROPERT, ainsi qu'Olivier PICHAYROU et Isabelle BARCELORD à la DR et Christine FAURE FEDIGAN à la Direction du Développement Durable.

À Jean-Luc PEYRON, qui n'a pas pu participer au jury, mais qui a pris le temps de rédiger un rapport sur mon mémoire, avec le regard de l'économiste, vont tous mes remerciements : ses commentaires ont été tout à fait précieux pour la phase de préparation de la soutenance, et pour l'amélioration du manuscrit.

Ce travail doit beaucoup à Jean-François BONNET, tout d'abord parce qu'il a inauguré la thématique « biomasse aux grandes échelles » au laboratoire TREFLE, mais surtout par le temps que nous avons passé à travailler ensemble sur différents points, ainsi que sur certaines publications. Qu'il en soit donc chaleureusement remercié. Merci également pour son soutien dans les moments de doute et pour son initiation à la « tétrapiloptomie ».

Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne citais pas mes colocataires successifs. Dans l'ordre chronologique, merci donc à Amar BOUCHAMA, à qui je souhaite beaucoup de réussite, d'un côté ou de l'autre de l'Atlantique. Nul doute que sa capacité d'investissement lui permettra d'arriver à ses fins. À Jean-François LINES, partagé entre deux laboratoires, merci également. Et puis, au dernier thésard avec qui j'ai partagé mon bureau, Xavier GOOSSENS, qui a par ailleurs aussi le titre de dernier thésard de Michel COMBARNOUS, un grand merci, pour nos discussions, pour l'intérêt qu'il a exprimé sur mon sujet de thèse et pour son intérêt général pour le genre humain.

À Yoann, qui, bien qu'étant dans la même situation que moi, a dû en plus supporter les états d'âmes de la thésarde au cours de ces trois ans, merci.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ GÉNÉRAL - EXECUTIVE SUMMARY

1. CONTEXTE GÉNÉRAL	1
1.1. LES GRANDS CHIFFRES À L'ÉCHELLE GLOBALE	1
1.1.1. Les consommations mondiales d'énergie	1
1.1.2. Les ressources à moyen terme	3
1.2. LES ÉVOLUTIONS DES VECTEURS ÉNERGÉTIQUES	3
1.2.1. Évolution de la population mondiale	3
1.2.2. Prévision de l'évolution des consommations d'énergie	5
1.3. CONSÉQUENCES : PROBLÉMATIQUE CO₂ ET GES EN GÉNÉRAL	7
1.3.1. Le cycle mondial du carbone	7
1.3.2. Intensification de l'effet de serre	9
1.3.3. Principe d'économie et principes de précaution	11
1.4. LES DIFFÉRENTS MODES DE STOCKAGE DE CARBONE	11
1.4.1. Les modes de stockage concentré	13
1.4.2. Les modes de stockage diffus	17
1.5. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	19
2. LES BIOMASSES FORESTIÈRES ET LEURS POTENTIELS	21
2.1. LES SURFACES BOISÉES ET LE CYCLE DU CARBONE	21
2.1.1. Bilans et évolutions	21
2.1.2. Les écosystèmes forestiers et les dynamiques de stockage	23
2.1.3. Les produits du bois et les dynamiques de stockage	25
2.2. CROISSANCE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS	27
2.2.1. Évolutions et échelles de description	27
2.2.2. Modèles d'évolution des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers	27
2.2.3. Facteurs limitants	33
2.2.4. Études de sensibilité	35
2.3. ESTIMATION DU POTENTIEL À L'ÉCHELLE GLOBALE	35
2.3.1. Incertitudes sur les stocks et flux existants	35
2.3.2. Paramètres pertinents pour l'évaluation à l'échelle globale	37
2.3.3. Première évaluation du potentiel à l'échelle globale	39
2.4. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	41
3. LA MAÎTRISE DES RESSOURCES FORESTIÈRES : FONCTIONS MULTIPLES, DÉMARCHES QUANTITATIVES	43
3.1. DES FONCTIONS MULTIPLES	43
3.1.1. Fonctions de productions	43
3.1.2. Préservation du milieu naturel	45
3.1.3. Aménagement pour des fonctions sociétales	45
3.1.4. Services environnementaux collectifs ou industriels	47
3.1.5. Quels liens entre ces fonctions, quelles dimensions principales ?	47
3.2. UN PROBLÈME MULTI-ÉCHELLES	49
3.2.1. Description des échelles d'espace	49
3.2.2. Description des échelles de temps	51

3.2.3. Quels liens entre les échelles ?	51
3.3. UNE DÉMARCHE QUANTITATIVE POSSIBLE : L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE	53
3.3.1. Présentation générale de la méthode	53
3.3.2. Limites de la méthodologie	57
3.4. OBJECTIFS RETENUS POUR CETTE ÉTUDE	61
3.4.1. Orientation du travail sur les trois directions principales	61
3.4.2. Indicateurs de comparaison entre les systèmes	63
3.5. LES SEPT CAS ÉTUDIÉS ET LA DÉMARCHE PROPOSÉE	65
3.5.1. Les sept cas étudiés	65
3.5.2. Application et adaptation de l'Analyse du Cycle de Vie	67
3.5.3. Démarche proposée	69
3.5.4. Rôle du temps	69
3.5.5. Application de la démarche aux cas d'étude	71
3.6. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	73
<hr/> 4. APPLICATION DE LA DÉMARCHE AU SEUL STOCKAGE DU CARBONE DANS LES FORÊTS	<hr/> 75
4.1. LE SYSTÈME ET LES CAS ÉTUDIÉS (I ET II)	75
4.1.1. Modes de stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers	75
4.1.2. Les deux cas étudiés (cas I, cas II)	79
4.2. FLUX ET BILANS	81
4.2.1. Flux d'énergie	81
4.2.2. Flux de carbone	83
4.2.3. Bilans	85
4.3. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ ET CALCULS D'INCERTITUDES	89
4.3.1. Horizon temporel	89
4.3.2. Conditions pédo-climatiques	89
4.3.3. Influence des éclaircies (cas I vs cas II)	93
4.3.4. Influence de l'antécédent cultural	93
4.3.5. Calcul d'incertitudes	95
4.4. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	97
4.4.1. Paramètres pertinents, goulots d'étranglement	97
4.4.2. Potentiel à grande échelle	99
4.4.3. Rendement de l'opération de stockage	99
<hr/> 5. APPLICATION À LA PRODUCTION DE BOIS DANS LA FORÊT DES LANDES D'AQUITAINE	<hr/> 103
5.1. LE SYSTÈME ET LE CAS ÉTUDIÉ (III)	103
5.1.1. Description de la filière bois issu du Pin Maritime en Aquitaine	103
5.1.2. Le cas étudié (cas III)	105
5.2. APPLICATION DE LA DÉMARCHE PROPOSÉE AU STOCKAGE DE CARBONE AVEC PRODUCTION DE BOIS	111
5.2.1. Flux de carbone et flux d'énergie	111
5.2.2. Bilans	113
5.3. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ ET CALCULS D'INCERTITUDES	119
5.3.1. Durée de vie des produits	119
5.3.2. Fin de vie des produits	121
5.3.3. Répartition des utilisations des productions	123
5.3.4. Calcul d'incertitudes	125
5.4. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	125
5.4.1. Paramètres pertinents, goulots d'étranglement	125

5.4.2. Potentiel à grande échelle	127
5.4.3. Modes d'action et marges de manœuvre	127
6. APPLICATION AU BOIS ÉNERGIE	129
6.1. LE SYSTÈME ET LES CAS ÉTUDIÉS (IV, V, VI ET VII)	129
6.1.1. Description des modes de production d'énergie à partir du bois	129
6.1.2. Les quatre cas étudiés (cas IV, cas V, cas VI et cas VII)	133
6.2. DESCRIPTION À L'ÉCHELLE LOCALE OU OPÉRATIONNELLE	133
6.2.1. Types d'exploitation	133
6.2.2. Types de combustibles	137
6.2.3. Type d'énergie produite et mode de substitution	137
6.3. FLUX ET BILANS	139
6.3.1. Flux d'énergie	139
6.3.2. Flux de carbone	141
6.3.3. Bilans	143
6.4. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ	145
6.4.1. Type d'énergie fossile substituée	145
6.4.2. Type d'énergie finale produite	145
6.5. EFFET DE BONIFICATION DU BOIS ÉNERGIE À L'ÉCHELLE GLOBALE : CAS VII	145
6.5.1. Scénarios retenus	145
6.5.2. Comparaison à l'échelle globale du stockage seul et avec production de bois énergie	147
6.6. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION	149
6.6.1. Paramètres pertinents, goulots d'étranglement	149
6.6.2. Potentiel à grande échelle	151
6.6.3. Modes d'action et marges de manœuvre	151
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	155
7.1. BILAN DES PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS	155
7.1.1. Les potentiels	155
7.1.2. Les facteurs limitants	157
7.2. LA GESTION DES FORÊTS, UN ÉLÉMENT INCONTOURNABLE D'UNE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE ET DE GESTION DES GAZ À EFFET DE SERRE	157
7.2.1. Stockage de carbone	157
7.2.2. Effets de substitution	159
7.3. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS MÉTHODOLOGIQUES DES ÉTUDES DE CAS	159
7.3.1. Une démarche possible : l'analyse du cycle de vie	159
7.3.2. La forêt : un système multifonctions	161
7.3.3. Les applications : les logiques projet	161
7.4. EN GUISE DE CONCLUSION	163
7.4.1. Définition d'une ingénierie de stockage de carbone	163
7.4.2. Mise en œuvre opérationnelle	163
7.4.3. Prise en compte des effets à l'échelle globale	165
RÉFÉRENCES	167
LISTE DES ILLUSTRATIONS	173
GLOSSAIRE	179
NOMENCLATURE	180

RÉSUMÉ

Ce travail est consacré à une étude des ressources forestières orientée principalement vers les usages énergétiques et l'emploi du bois comme matériau, tous deux couplés à la problématique générale de lutte contre l'intensification de l'effet de serre. Il comprend tout d'abord trois chapitres, dans lesquels sont présentées quelques grandes données du contexte général de l'étude, ainsi que des éléments méthodologiques. Plusieurs chapitres détaillent des cas d'étude sur lesquels se développe le travail avant que ne soient enfin dégagées les grandes conclusions et perspectives du travail au chapitre 7.

Le **chapitre 1** présente les grandes données relatives aux consommations mondiales d'énergie, ainsi que les différents vecteurs énergétiques, et rappelle la problématique des gaz à effet de serre au sein desquels le CO₂ joue un rôle principal, en évoquant les différents compartiments du système « Surface Terrestre – Atmosphère » (STA). Dans les échanges entre les différents compartiments du système STA, le rôle du bois énergie est mis en évidence. Enfin, les différents modes de stockage de carbone sont évoqués, en mettant un accent particulier sur la capture et le stockage du carbone diffus, notamment par l'utilisation de la biomasse. Une analyse de la consommation énergétique mondiale montre que depuis les 30 dernières années, la consommation individuelle d'énergies de tous types est constante et égale à environ 1,6 tep/(hab.an). Ce résultat met bien en évidence l'ampleur des besoins tant sur les quantités d'énergie que sur les ressources, en particulier fossiles carbonées, et les conséquences de ces consommations sur les émissions de gaz à effet de serre. Consommations énergétiques mondiales et évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ conduisent alors à deux types de réflexions, regroupées sous les intitulés de principe d'économie et principes de précaution : l'existence de ressources limitées en combustibles fossiles, en particulier en pétrole et en gaz, conduit à en réduire l'utilisation (principe d'économie), et dans un avenir proche, l'usage massif des combustibles carbonés impose de prendre en compte la capture et le stockage du carbone (principes de précaution).

Le **chapitre 2** est consacré exclusivement aux biomasses forestières, à des données générales sur les surfaces boisées et à leur rôle dans le cycle du carbone. Après quelques indications sur les modes de croissance des écosystèmes, qu'il s'agisse d'un arbre isolé, d'un peuplement ou d'un massif entier, sont présentées différentes estimations des stocks et flux échangés actuellement entre les forêts et l'atmosphère. La présentation des différents modes d'estimation des flux échangés entre biomasses terrestres et atmosphère met en évidence l'importance de la méthode de calcul retenue et des phénomènes pris en compte. L'accent est mis ensuite sur les paramètres nécessaires et suffisants en première approche pour l'estimation de l'incrément de stockage potentiel dans les forêts, à la fois en stock et en flux de stockage. La grande variabilité des estimations existant dans la littérature est mise en avant : cette variabilité est liée principalement aux scénarios utilisés pour le calcul et à la résolution des conflits d'usages des sols.

Le **chapitre 3**, quant à lui, présente les principaux éléments méthodologiques de l'étude. Les différentes fonctions des forêts, du rôle de production à celui d'aménagement du territoire, en passant par diverses fonctions environnementales, sont d'abord évoquées. Les trois dimensions sur lesquelles se concentre le travail sont

ensuite présentées : stockage de carbone sur pied, produits du bois et bois énergie. En insistant de nouveau sur les problèmes d'échelles territoriales, locales, régionales et globale, une démarche quantitative est envisagée pour la majorité des études de cas : l'analyse du cycle de vie (ACV). La méthode est présentée, ainsi que les adaptations aux cas proposés, caractérisés par de multiples échelles et de multiples fonctions. La démarche s'appuie également sur deux principaux bilans, le bilan d'énergie et le bilan de carbone. En ce qui concerne le bilan d'énergie, il s'agit de prendre en compte de la manière la plus exhaustive possible le type d'énergie primaire utilisée pour l'exploitation des ressources forestières. Dans ces estimations, non seulement les types d'énergie sont identifiés, mais ils sont en outre mis en regard de l'utilisation qui en est faite.

Enfin est présenté dans ce chapitre l'ensemble des cas d'étude développés dans les trois chapitres suivants, chacun d'entre eux étant consacré principalement à l'une des trois dimensions identifiées précédemment. En ce qui concerne les premiers usages du bois produit dans ces cas simples, on insiste déjà sur la nécessaire comparaison entre les usages de ce bois et d'autres démarches visant à assurer les mêmes fonctions. Parmi les questionnements auxquels l'étude essaie de répondre, se trouve celle de l'intérêt de la logique de substitution : quel intérêt a tel ou tel usage du bois par rapport à tel autre matériau ? Quel intérêt a le bois énergie par rapport aux combustibles fossiles ?

Les aptitudes des forêts au seul stockage de carbone sont évoquées dans le **chapitre 4**, en s'appuyant sur deux cas. Le premier cas (**cas I**), concerne la situation la plus simple, où, à partir de terres non initialement boisées, un peuplement est réalisé et laissé en libre croissance. À partir de la phase de plantation, le système croît en prélevant du carbone dans l'atmosphère. Comme pour tout organisme vivant, cette croissance s'amplifie d'abord progressivement au cours du temps, puis se stabilise avant que ne s'établisse un régime permanent, pour lequel les échanges s'annulent. Il existe donc une durée de vie du peuplement pour laquelle le prélèvement de carbone est maximal. L'accent est mis dans ce cas sur les variations du stock en fonction des biomes, c'est-à-dire des types de couvert forestier. Le deuxième cas (**cas II**), correspond quant à lui à une amélioration du processus décrit dans le cas I : par la pratique d'éclaircies, est recherchée une meilleure efficacité de l'opération de stockage, c'est-à-dire la croissance générale du système. L'accent est mis sur les consommations énergétiques unitaires externes, associées à l'exploitation d'une partie de la forêt, et sur leur part dans le bilan net de carbone. Le surcroît de consommation énergétique mobilisée dans le cas II par rapport au cas I est mis en regard des améliorations de l'aptitude au stockage du carbone qu'il permet. L'importance de la substitution est soulignée par l'étude de trois usages différents des produits des éclaircies : pour la production d'énergie, pour la fabrication de panneaux de bois ou pour la production de papier ou carton.

L'utilisation du bois récolté dans des produits variés fait l'objet du **chapitre 5** qui ne traite que d'un seul cas, à l'échelle régionale, le massif des Landes d'Aquitaine (**cas III**). En l'état actuel de pseudo-équilibre du massif, les temps de stockage du carbone sont d'une vingtaine d'années dans le bois sur pied et d'une durée sensiblement comparable, voire supérieure, dans les produits issus de la forêt. Sont ensuite évoqués les déplacements de cet équilibre qui peuvent être mis en place par la modification des modes de gestion et par la redistribution des produits, toutes deux orientées vers une utilisation plus intense du bois comme matière première de produits de plus longue durée de vie ou appliquées à de nouveaux usages du bois. Les modifications potentielles de cet équilibre sont évoquées, par des déplacements qui correspondent à des modifications des modes de gestion, qui consisteraient par exemple à des nouveaux usages du bois. À l'appui de ces objectifs, la démarche ACV permet d'identifier des points sur lesquels peuvent être modifiés les choix. Les différents postes de consommation d'énergie fossile sont mis en avant, ainsi que leurs importance dans les émissions de dioxyde

de carbone, en particulier les transports et les transformations successives du bois. Des estimations sont faites sur les possibles revalorisations des déchets du bois et leurs conséquences sur le bilan global en carbone de la filière entière. De plus, d'un point de vue méthodologique, l'importance des choix en matière de références est mise en évidence, en particulier en ce qui concerne l'échelle temporelle : lorsque pour l'étude de l'influence des durées de vie des produits une valeur nominale est retenue, par rapport à laquelle le stock de carbone de chaque ligne de produits est pondérée, l'impact des différents produits est forcément relatif. Un point complémentaire est enfin abordé, l'examen de certaines filières produits du massif des Landes de Gascogne, qui met bien en évidence le rôle du séchage du bois dans les consommations d'énergie et donc dans les émissions totales de carbone sur l'ensemble de la filière.

L'utilisation du bois énergie, l'un des moyens possibles pour satisfaire tout à la fois le principe d'économie d'énergie fossile et les principes de précaution vis-à-vis de l'effet de serre, fait l'objet du **chapitre 6** dans lequel 4 cas sont étudiés. Les trois premiers sont tous centrés autour de la meilleure utilisation possible d'une parcelle pour la production de bois énergie : taillis à courte rotation (**cas IV**), production conjointe de bois d'œuvre et de bois énergie (**cas V**) et production de bois énergie à partir de déchets du bois (**cas VI**). Ces trois cas permettent d'aborder sous différents angles les modes de couplage des deux objectifs que sont le stockage de carbone sur pied et la production d'énergie. Une appréciation quantitative est faite de l'effet du surcroît d'énergie mobilisée pour la gestion des ressources forestières sur l'aptitude au stockage de carbone. Parmi les éléments présentés dans ce chapitre figure la comparaison entre les différents modes de production d'énergie à partir du bois et une comparaison est proposée entre les différents types de production d'énergie finale en regard des énergies qu'ils remplacent.

Toujours dans le même chapitre, le dernier cas étudié présente, à l'échelle globale, un calcul de l'effet de bonification du bois énergie par rapport au stockage seul du carbone (**cas VII**). À partir d'une référence que constituent les différents niveaux de réserves fossiles, les usages de surfaces potentiellement disponibles pour le seul stockage par plantation ou pour la plantation avec production de bois énergie sont comparés à l'échelle globale et l'intérêt du bois énergie est mis en avant. Pour une même surface disponible à l'échelle mondiale, l'utilisation du bois énergie permet d'améliorer le bilan en carbone sur une période de référence de 20 à 73 %.

En conclusion, dans le **chapitre 7**, les principaux résultats de l'étude sont rappelés et un certain nombre de recommandations sont énoncées, sur la base d'éléments quantifiés dans les différentes études de cas :

- dans le cadre d'une réflexion générale sur les consommations énergétiques mondiales et leurs conséquences sur l'intensification de l'effet de serre, la gestion des écosystèmes forestiers apparaît comme un élément incontournable à court ou moyen termes,
- la définition d'une ingénierie du stockage de carbone par les écosystèmes forestiers nécessite la constitution d'une base de données des différents cas existants, mais doit se baser sur plusieurs grands principes comme le développement des usages du bois pour des produits à longue durée de vie et dont la fabrication est peu coûteuse en énergie,
- l'usage du bois pour la production d'énergie revêt une importance particulière, tant à l'échelle globale qu'aux échelles locales, dans la mesure où il permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre tout en préservant les ressources fossiles,
- dans la mesure où les forêts ont de nombreuses fonctions, autres que les trois seules évoquées au travers des différentes études de cas, il convient d'adapter et de généraliser la démarche aux usages multiples des écosystèmes forestiers.

EXECUTIVE SUMMARY

This work is devoted to a study on forest resources and on their uses as energy and wood material, both functions which are coupled with the general problems of the limitation of the anthropogenic greenhouse effect. Its first 3 chapters are concerned with some global data on the general context of the study, as well as with methodological elements. In the three following chapters detailed case studies are to be found, on which this work is based, and in the final chapter, the main conclusions and perspectives of the work are finally drawn.

Chapter 1 presents the main data relating to world energy consumption, as well as the various energy vectors. The five conventional primary energy vectors are of course fossil fuels (coal, oil and gas), nuclear energy and hydro-electricity. Other energy sources may play a significant role, such as geothermal energy and renewable energy. The biomass in particular represents at the global scale as much as nuclear or hydropower, as far as primary energy is concerned. This part draws attention to the problems of the human amplification of greenhouse effect in which CO₂ plays a major role. After a presentation of the various compartments of the “Earth Surface – Atmosphere” system (ESA) and of the fluxes exchanged between those compartments, the role of the terrestrial biomass is pointed out. The analysis of global energy consumption in the last 30 years shows that the individual energy consumption has been constant, equal to 1,6 toe/(inhab.yr) given the demographic growth of the population. This result points out the increasing needs in energy resources and the consequence on the greenhouse effect. The increase of world energy consumptions and evolution of atmospheric CO₂ concentration lead then to two types of reflections, gathered under the headings of economy principle and precaution principles. Limited resources out of fossil fuels, in particular out of oil and gas, imply the necessarily restricted use of those resources (economy principle). And in the near future, the massive use of carbonaceous fuels implies taking into account the capture and the storage of carbon (precaution principles). Among all the exchanges between the various compartments of the ESA system, the role of wood energy is highlighted. Finally, the various ways of carbon storage are presented, by emphasizing on the capture and storage of diffuse carbon, in particular by the use of the biomass.

Chapter 2 is devoted exclusively to the forest biomass, general data on the forest areas and to their role in the global carbon cycle. After describing some aspects of the growth of forest ecosystems, at the scale of one tree only, as well as at a stand scale or at the global forest scale, various estimates of stocks and flows currently exchanged between the forests and atmosphere are presented. A possible forest growth modeling is proposed, based on earlier studies, and limiting factors are listed as well as the sensitivity of the forest ecosystem to those parameters and of the quantity of carbon stored. The presentation of the various estimates, in the literature on the subject, of flows exchanged between the terrestrial biomass and atmosphere highlights the importance of precisising the calculation method used (bottom up or top down methods) and the phenomena taken into account (only anthropogenic changes or all sources of variations in fluxes). Stress is then put on the necessary parameters for the estimation of a potential increment of carbon storage in forest ecosystems, as well in stocks as in fluxes of carbon. The great variability of the estimates in the literature is shown: this variability is mainly related to the scenarios used for calculation and the resolution of the land use conflicts. Every estimate of potential

increment in the carbon storage of forest ecosystems should be presented with the time frame on which the estimate is supposed to be valid, and with the area affected to new plantations of forest together with the biomass yield used for calculation.

As for **chapter 3**, it presents the main methodological elements on which the study is based. The various functions of forests are first developed, from the role of wood material, energy wood or food production to the one of land use planning, through various environmental functions, such as soil preservation, biodiversity protection or water management. Three dimensions are then presented, on which the work concentrates: carbon storage in the living biomasses and the forest ecosystem taken together as wholes, wood products and wood energy production. While insisting again on the importance of the various geographical scales, local, regional and global, a quantitative approach is proposed for most of the case studies developed in the following parts, which is Life Cycle Assessment (LCA). This method is presented, from an historical point of view and from a practical point of view. The limitations of LCA are pointed out, in order to explain the possible adaptations to suggested cases, characterized by multiple scales in time and in space and by multiple functions. Those adaptations are based on the fact that it is difficult to limit the study of carbon storage to a single functional unit, as it is proposed in LCA methodology. The approach is also based on two main combined balances, an energy balance and the associated carbon balance. With regard to the energy assessment, the primary energy type, used for forest resources management, harvest and transformation, has to be taken into account in the most exhaustive possible way. Within these estimates, not only the primary energy types are identified, but also the final use of energy as well.

All the case studies developed in the three following chapters are then presented, each one of them being devoted mainly to one of the three dimensions previously identified. With regard to the first uses of the wood produced in these simple cases, emphasis is already laid on the necessary comparison between the uses of this wood and other steps aiming at providing the same functions. In other words, the question is more about substitution: which use of wood is the most interesting in its substitution to other material? Does wood energy have a particular interest compared to fossil fuels, and on what conditions?

The forests' ability to carbon storage only are evoked in **chapter 4**, through two case studies: the first example (**case I**), relates to the simplest situation, in which a settlement is carried out starting from grounds not previously covered by forests and is left in free growth. Starting from plantation, the system grows while taking carbon out of the atmosphere. As with any living organism, this growth develops gradually with time until the time at which the taking away of carbon is at a maximum. Lastly, stabilization is reached, for which exchanges between the ecosystem and the atmosphere cancel each other. Stress is put in this case on the stock variations between the various types of forests, depending on climatic and soil conditions. As for the second case (**case II**), it corresponds to an improvement of the process described in case I: by the use of thinning, a better effectiveness of carbon storage, that is to say the general growth of the system, is aimed at. Stress is put on external unit power consumptions, associated with the management of a part of the forest, and on their share in the global assessment of carbon. The effect of an addition of external energy consumption mobilized in case II compared to case I is measured on the improvements of the carbon storage that may follow. The importance of substitution is underlined by the study of three different uses of the thinning products: in energy production, the manufacture of wood panels or the production of paper or paperboard.

The use of wood for different types of product is studied in **chapter 5** which treats of one only case, at the regional scale, the forest of the Landes d'Aquitaine in the south-west of France (**case III**). In the current steady state of pseudo-balance in the managed stand, carbon storage lasts for about 20 years in the living biomass and for an appreciably comparable time, even higher, in products resulting from harvest. Displacements of this balance are then developed, which can be set up by a modification of the types of management and by the redistribution of harvested wood between the various products, in order to have a more intense use of wood as raw material for products of longer lifespan or even by developing new uses of wood. In order to satisfy these objectives, the methodology of LCA helps identifying the main points on which choices could be modified. An assessment is made of different energy consumptions, fossil fuel in particular, along with wood production and transformation, as well as the related carbon dioxide emissions, mainly from transport and from successive wood processing operations. Estimates are made on possible revalorizations of wood wastes and their effects on the total carbon assessment. Moreover, from a methodological point of view, importance of references' choices is highlighted, in particular with regard to the time scale considered: in this study, the stress is put on the fact that the influence of products of various lifespans is necessarily relative to the reference period used for carbon stock estimates. The influence of short lasting products is all the more important as the reference time is short. A final complementary point is developed with the particular study of some wood uses, which shows the importance of wood drying in the global energy consumption and carbon emissions.

The use of wood energy, one possible way to satisfy both the principle of fossil fuel economy and the principles of precaution with respect to the greenhouse effect, is studied in **chapter 6** in which 4 cases are presented. The three first cases are all centered on the best possible use of one unit stand for the production of wood energy: first of all with short rotation coppice production (**case IV**), then with joint production of commercial wood and wood energy (**case V**) and at last with production of wood energy from wood waste (**case VI**), either from harvest residues or from waste resulting from wood processing. These three cases approach with various points of view the coupling of two objectives among the three presented throughout this study, which are on the one hand carbon storage in living biomasses and forest ecosystems and on the other hand energy production. A quantitative appreciation is made of the effect of the supplementary energy mobilized for forest stock management on total carbon storage potential and a comparison is proposed between final energy production types and the types of substituted energy.

In the same chapter, one last studied case leads to an estimate at the global scale of combined wood energy production and carbon storage compared to the use of the very same area only for carbon storage (**case VII**). Five levels of fossil reserves are used together with their potential total carbon emissions into the atmosphere, from which time scales are defined. The uses of surfaces potentially available for storage by plantation only or for plantation forests with production of wood energy are then compared at the global scale, based on the time scales defined. In this way, the particular interest of wood energy is highlighted. Among all the elements presented in this chapter the comparison between the various modes of energy production from wood are detailed. With the same available area at the global scale, the use of wood for energy production could increase the benefit on the carbon balance of 20 to 73 % on a given reference period.

In conclusion, in **chapter 7**, the main results of the study are recalled and a certain number of recommendations are stated, based on quantified elements detailed in the various case studies:

- within the framework of a general reflection on world energy consumptions and their effects on the greenhouse effect intensification, the management of forest ecosystems appears to be an element impossible to circumvent within short or medium terms,
- the definition of an engineering of carbon storage in forest ecosystems requires the constitution of a database of various existing cases, but must be based on several principles like the development of the uses of wood for products of long lifespans whose manufacture would require less energy,
- the use of wood for energy production is of a particular importance, as well at the global and local scales, insofar as it makes it possible to limit the greenhouse gas emissions while preserving fossil energy resources,
- insofar as forests have many various functions, other than the three only evoked through the case studies taken into consideration, it is appropriate to adapt and to generalise the proposed method to the multiple uses of forest ecosystems.

1. CONTEXTE GÉNÉRAL

1.1 LES GRANDS CHIFFRES À L'ÉCHELLE GLOBALE

1.1.1 Les consommations mondiales d'énergie

Sont considérées ici les consommations d'énergie parfois qualifiées « d'explicites », par opposition aux consommations dites « implicites » d'énergie que sont notamment les consommations alimentaires humaines [Bonnet, 1998] : ce sont celles qui correspondent, d'une part, aux grands vecteurs énergétiques que sont les combustibles carbonés (charbon, pétrole, gaz), le nucléaire et l'hydraulique et, d'autre part, à des formes moins « massives » d'énergie, souvent renouvelables, comme l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice, l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique), la géothermie et certaines formes d'utilisation de la biomasse (bois, charbon de bois, déchets divers, biocarburants, biogaz,...).

En ce qui concerne les historiques de consommations, les situations de ces deux groupes sont assez différentes. Les données relatives aux grands vecteurs énergétiques, combustibles fossiles, énergie nucléaire et hydroélectrique, sont renseignées d'une manière relativement exhaustive et ceci depuis longtemps [BP, 2004]. Quant aux formes moins massives, plusieurs difficultés sont à noter lorsque l'on cherche à les consolider à l'échelle mondiale : la disponibilité de données qui sont souvent dispersées, leur hétérogénéité et leurs conversions sont parfois difficiles à maîtriser. Cette contribution, d'une comptabilité moins stricte que celle des énergies conventionnelles, n'apparaît généralement pas dans le bilan des énergies primaires. Il est néanmoins possible, pour ces formes d'énergie, de faire deux remarques :

- le poids relatif des formes qualifiées de « moins massives » reste constant par rapport à l'ensemble sur les trente dernières années : bien sûr l'éolien « électrique » connaît un essor important, mais le « bois combustible » évolue plus lentement, la géothermie s'est beaucoup développée et marque un peu le pas...
- globalement ce poids relatif peut être estimé à 5 à 10 % de l'ensemble des consommations explicites, suivant les années d'observation.

À l'échelle du globe, les principales consommations explicites d'énergie correspondent aux cinq vecteurs principaux déjà identifiés, auxquels il convient d'ajouter le « bois combustible » (Figure 1.1), dont la contribution dans le bilan d'énergie primaire est du même ordre de grandeur que celles de l'énergie nucléaire et de l'énergie hydroélectrique. Ces seuls vecteurs fournissent actuellement un peu plus de 9800 Mtep, soit l'équivalent d'environ 13 500 « tranches virtuelles de 1 000 MW », fonctionnant sans aucun arrêt :

- les produits fossiles carbonés, qui constituent en quelque sorte des stocks anciens d'énergie solaire : le pétrole (37 %), le charbon (25 %) et le gaz (24 %), constituant la majorité de ces consommations,
- l'énergie nucléaire (7 %), dont la production considérée ici est celle d'électricité, dont la valeur « exergétique » unitaire (Encadré 1.1) est supérieure à celles des trois sources précédentes [Loiseaux *et al.*, 2002], et dont l'ampleur est relativement stable dans les périodes récentes,
- l'électricité d'origine hydroélectrique (7 %), une forme d'énergie solaire, pour laquelle la remarque précédente sur sa haute valeur exergétique s'applique également,

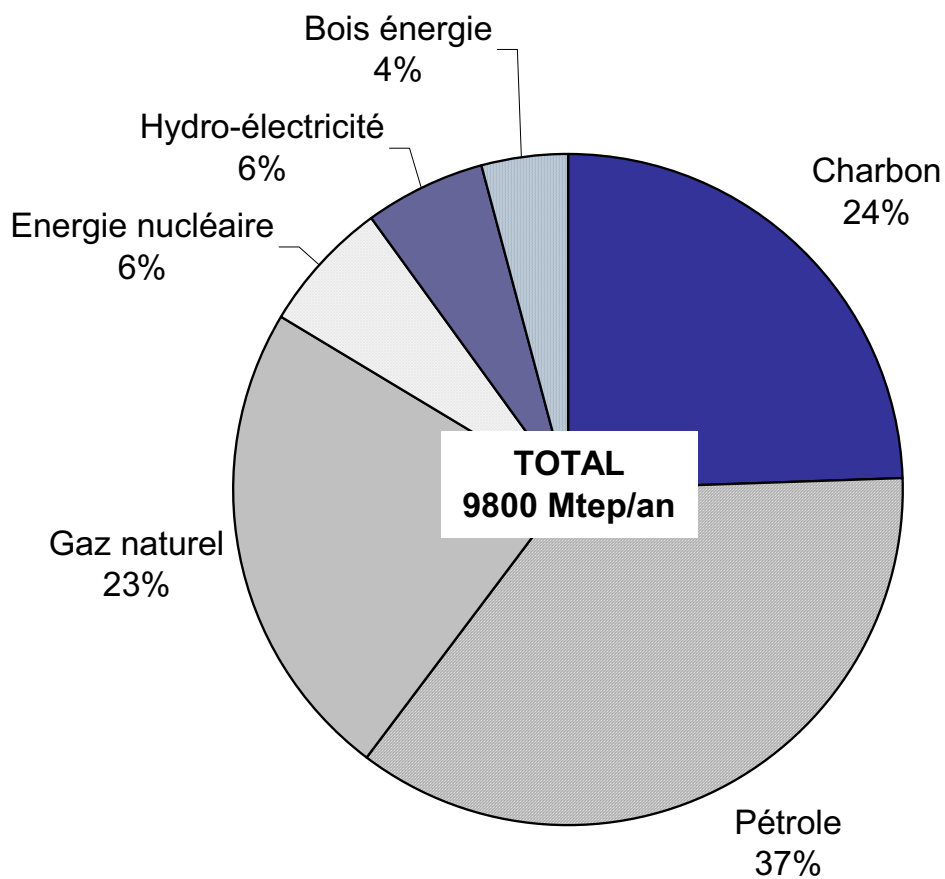


Figure 1.1 – Consommations d'énergie primaire dans le monde, en 2002 (soit pour une population de 6,2 Ghab).
 Sources : BP (normes internationales) pour les énergies conventionnelles et FAOSTAT pour le bois énergie.
 Le calcul de la contribution du bois énergie, a été fait en supposant une densité de 0,725 t/m³ pour le bois (donnée FAOSTAT) et sur la base d'un Pouvoir Calorifique Inférieur de 18,2 MJ/kg soit 0,43 tep/t de bois.

- enfin la biomasse végétale ligneuse, et en particulier le bois. Le bois énergie ne représente pas là la seule forme d'énergie issue de la biomasse végétale. Ces différentes formes d'énergie issues de la biomasse seront évoquées plus longuement dans un chapitre suivant du présent manuscrit.

1.1.2 Les ressources à moyen terme

Il y a lieu de faire quelques remarques complémentaires, concernant les seuls combustibles « carbonés », pétrole, gaz et charbon, et leurs stocks :

- de ces trois combustibles, le charbon est celui dont les réserves sont les plus importantes. Elles sont considérées, en effet, en y incluant le lignite, comme équivalentes à environ 800 Gtep, soit plusieurs siècles de consommation au rythme actuel de prélèvement sur les réserves [WEC, 1998],
- le gaz, dont les réserves mondiales sont estimées à 150 Gtep (170 MMm³ environ), soit plus d'un demi-siècle de la consommation des années 2000 (les réserves ultimes seraient trois à quatre fois plus importantes), connaît depuis plusieurs années un développement régulier, favorisé entre autres choses par sa souplesse d'utilisation,
- le pétrole, dont les réserves prouvées et récupérables (250 Gtep environ) ont une ampleur sensiblement comparable à celle du gaz, soit environ 70 années au rythme actuel de consommation, et dont l'utilisation principale correspondra de plus en plus aux transports. Il est à noter qu'en ce qui concerne ce combustible, l'évolution des techniques de récupération joue un rôle important dans l'estimation des quantités qui sont effectivement récupérables, réévaluées pratiquement chaque année à la hausse, du fait de l'amélioration des rendements de récupération [Alazard et Montadert, 1993],
- enfin, ne sont pas indiqués, dans les chiffres ci-dessus, les perspectives offertes par deux autres sources fossiles, d'une part les sables bitumineux (environ 54 Gtep dans le monde en réserves prouvées et 308 Gtep en réserves connues, [Commissariat général du plan, 1998] *in* [Alpern et Lemos de Sousa, 2002]) et les schistes bitumineux (environ 76 Gtep en réserves prouvées et 286 en réserves additionnelles, [WEC, 1998] *in* [Alpern et Lemos de Sousa, 2002]) et d'autre part, éventuellement, les hydrates de gaz (675 Gtep dans le permafrost et 18000 Gtep dans les sédiments océaniques, [McDonald, 1990] *in* [Alpern et Lemos de Sousa, 2002]).

L'évolution dans le temps, durant les trente dernières années, des six vecteurs énergétiques évoqués (charbon, pétrole, gaz, nucléaire, hydro-électricité et bois), montre une certaine stabilité des parts relatives de chacun de ces vecteurs, dans une tendance générale qui accompagne visiblement la progression de la population mondiale.

1.2 LES ÉVOLUTIONS DES VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

1.2.1 Évolution de la population mondiale

Après une période où la référence dominante était la « croissance exponentielle », avec tout ce que cela sous-entend d'expansion incontrôlée, il apparaît nettement que la situation actuelle correspond plutôt à ce que les démographes appellent une transition démographique [Léridon, 2003, Lutz *et al.*, 2001].

Encadré 1. 1 - Les formes d'énergie et les statistiques mondiales

Les activités humaines mobilisent de grandes quantités d'énergie, qui prennent des formes différentes selon les usages qui en sont faits. Les grandes catégories d'usages finaux de l'énergie qui peuvent être distinguées sont les suivantes : énergie thermique, énergie électrique, énergie mécanique et sur un plan un peu différent, énergie alimentaire. Chaque type d'énergie finale peut être issue de différentes filières, qu'il conviendra de prendre en compte pour estimer l'énergie primaire totale consommée, dans la mesure notamment où les rendements respectifs des différentes installations peuvent varier significativement d'une filière à une autre.

Les statistiques internationales peuvent ainsi varier d'une évaluation à une autre, selon le mode de calcul retenu et la méthode utilisée pour agréger des données sur des énergies de nature souvent difficilement comparable. Le cas de la production d'électricité illustre bien cette situation, et la difficulté à rendre homogènes des données sur des types de consommations ou des sources d'énergie très différentes. La tonne d'équivalent pétrole (tep), généralement adoptée dans les statistiques internationales, est délicate à utiliser quand il s'agit de quantifier l'énergie électrique produite à partir d'installations nucléaires, éoliennes, solaires ou encore hydrauliques. Leur contribution, d'une ampleur non négligeable, doit cependant apparaître dans les bilans globaux d'énergie.

La comparaison des statistiques internationales avec les statistiques françaises illustre bien cette difficulté, du fait de l'importance de l'énergie nucléaire dans le bilan national, et de la comptabilité qui en est faite. Jusqu'à une période très récente, la conversion en tep/an des flux d'énergie électrique exprimés en MWh/an se faisait dans les statistiques internationales sur la base d'un coefficient de 0,083 tep pour 1 MWh et dans les statistiques françaises avec un coefficient de conversion de 0,222 tep pour 1 MWh, qui tenait compte d'un rendement pour produire la même quantité d'électricité à partir d'énergie fossile.

Dans tout ce document, sauf indication contraire, les normes de calcul retenues seront les normes internationales.

Enfin, en ce qui concerne les sources des données utilisées dans ce document, les principales sont :

- Pour les consommations ou les productions d'énergie, les statistiques BP, WRI et IEA,
- Pour la biomasse : les données FAO et WRI.

A partir d'un premier état, où taux de natalité et de mortalité, égaux, étaient relativement forts (plus de 3 % par an), se met en place, actuellement, un autre régime où la population totale sera de nouveau stable, mais avec des taux de mortalité et naissance relativement plus faibles. Ainsi, par exemple en Europe, les taux de natalité dans les années 1995 à 2000 étaient compris entre 0,9 pour la Bulgarie et 2,1 pour l'Albanie, et sur la même période, les taux de mortalité étaient compris entre 0,5 pour l'Albanie et 1,5 pour l'Ukraine [WRI, 1999]. La période actuelle correspond sensiblement, en moyenne à l'échelle globale, au point d'inflexion de la courbe sigmoïde décrivant la population en fonction du temps. La tendance générale décrite ici cache bien sûr de très fortes hétérogénéités géographiques, correspondant à des situations diverses par rapport aux courbes d'évolution de la population évoquées. Certains pays d'Europe au nord de la Méditerranée ont déjà de réels problèmes de renouvellement de la population. À l'inverse, dans le Maghreb par exemple, le Maroc est encore en pleine expansion démographique : d'un peu plus de 6 millions d'habitants dans les années 1920, la population est montée à un peu moins de 12 millions en 1960 et à 29 millions d'habitants en 2000 (dont 70 % de moins de 30 ans).

Constituée de près de 6,5 milliards actuellement [FAOSTAT, 2004], la population totale se situera probablement à plus ou moins long terme entre 8 et 10 milliards d'habitants. Actuellement la population mondiale croît chaque année d'environ 1,2 %, ce qui correspond à un accroissement, chaque jour, de plus de 200 000 habitants (bilan net des naissances moins les décès).

1.2.2 Prévision de l'évolution des consommations d'énergie

Dans ce contexte, une prévision, en première approximation, à court et moyen termes, de l'évolution des consommations énergétiques mondiales est possible, en se basant à la fois sur les évolutions, sur les trois dernières décennies, de la population mondiale et des consommations d'énergie primaire explicite.

Le point le plus significatif pour cette estimation, dans les observations concernant ces consommations explicites d'énergie, est le suivant : lorsque l'on considère la consommation annuelle d'énergie, à l'échelle mondiale, par habitant, on constate que depuis une trentaine d'années, la consommation dans le monde, par habitant et par an, correspondant aux grands vecteurs énergétiques, est restée sensiblement constante, égale à environ 1,5 tep/(hab.an) (Figure 1.2). L'intégration des formes dites moins massives à cet agrégat, et notamment du bois énergie, conduit à une valeur, également stable, d'environ 1,55 tep/(hab.an), en ajoutant uniquement le bois énergie, ou 1,6 tep/(hab.an) en prenant en compte toutes les autres formes d'énergie renouvelables et la géothermie.

Cette observation, qui peut surprendre a priori, est due à la conjonction de deux effets contraires : les gros consommateurs (USA, Canada,...) ne réduisent pas leurs consommations, tandis que les moins développés consomment plus d'énergie, mais le poids en terme de population des plus grands consommateurs d'énergie, nord-américains en particulier, diminue. Les ampleurs relatives de ces deux effets sont telles qu'apparaît un effet de compensation. Cet effet peut cependant ne pas se prolonger à long terme, soit du fait d'un développement très rapide des pays où la population croît très vite, tels la Chine ou l'Inde, ce qui induirait une augmentation de la consommation mondiale individuelle, soit du fait d'un meilleur contrôle des consommations énergétiques, qui pourrait à plus long terme conduire à diminuer la consommation individuelle d'énergie.

**Consommations d'énergies conventionnelles par habitant dans le monde,
les PED (---) et les PD (—).**

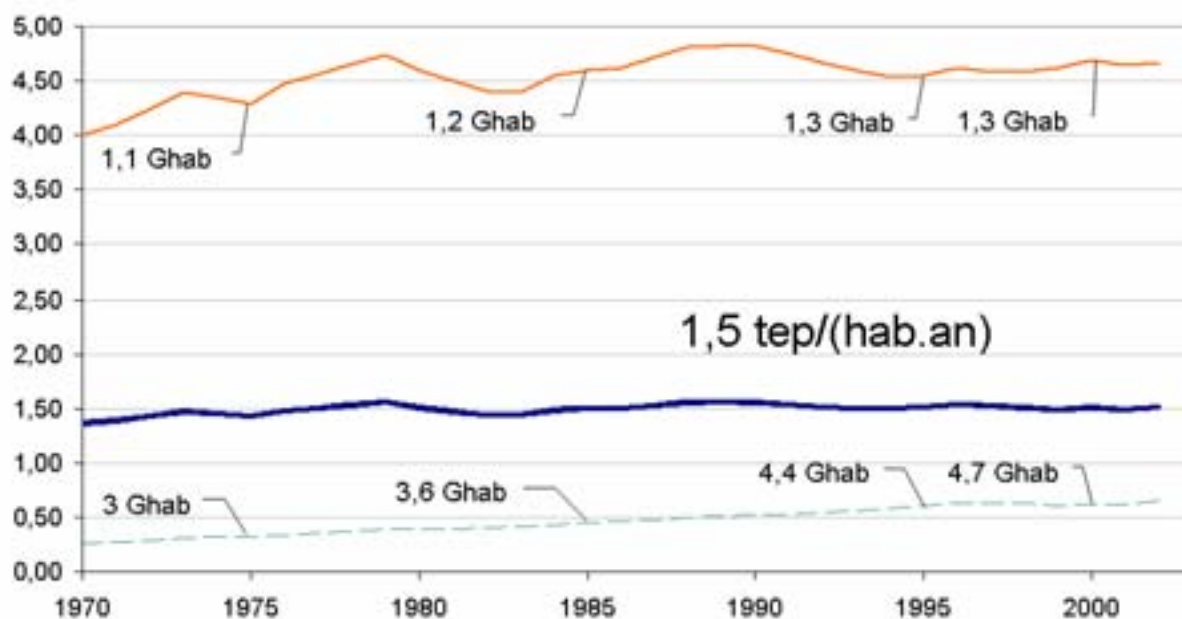


Figure 1.2 – Consommations individuelles d'énergies conventionnelles dans le monde (charbon, pétrole, gaz, hydro-électricité et énergie nucléaire), les pays en voie de développement et les pays développés.

Sources des données : BP (normes internationales) pour les consommations d'énergies conventionnelles dans le monde et FAOSTAT pour les données relatives à la population mondiale. Dans les deux cas, les données correspondent aux mises à jour de l'année 2004.

Ce résultat peut toutefois constituer en lui-même le fond d'une méthode robuste de prévision des évolutions des consommations d'énergie. Ce calcul n'est bien sûr valable qu'à court et moyen termes, dans la mesure où l'évolution de la population reste sensiblement la même et où on assiste pas par exemple, à un développement des consommations d'énergie massif et soudain dans des pays comme l'Inde où la croissance démographique est encore forte.

Chaque jour, pour fournir de l'énergie aux 200 000 habitants supplémentaires, il faut donc, bien sûr, accroître la mobilisation d'énergie d'environ 300 000 tonnes d'équivalent pétrole par an.

C'est-à-dire, pratiquement, mettre en service, chaque jour, un ensemble d'éléments produisant près de 500 MW thermiques et fonctionnant sans discontinuer. Cet ensemble, qui pourrait être qualifié de « tranche virtuelle », correspond à la mobilisation d'éléments réels, d'un type ou d'un autre, produisant, en fonctionnement, environ 1000 MW, en production concentrée ou sous la forme virtuelle de sources dispersées.

Bien sûr pour affiner ce résultat, il conviendrait de prendre en compte les problèmes de rendements thermodynamiques (par exemple, comme il a déjà été évoqué, pour la combustion de pétrole en vue de la production d'électricité), les durées réelles de fonctionnement des différentes installations (par exemple environ 2500 heures/an pour une éolienne),...

Dans le décor qui vient d'être esquissé, plusieurs points semblent devoir être repris :

- la nécessité d'augmenter chaque jour les capacités de production d'énergie,
- une certaine inertie dans les redistributions entre les différents types de vecteurs énergétiques (Figure 1.3),
- l'importante place occupée par les combustibles fossiles « carbonés » (plus de 80 %),
- et les réserves en ces combustibles, sous toutes les formes actuellement étudiées, qui restent importantes.

Dans ce contexte, il ne fait pas de doute que le rôle des combustibles carbonés, dans les prochaines décennies, restera tout à fait important.

1.3 CONSÉQUENCES : PROBLÉMATIQUE CO₂ ET GAZ À EFFET DE SERRE EN GÉNÉRAL

1.3.1 Le cycle mondial du carbone

Les surfaces boisées forment l'essentiel de la biomasse continentale, un des trois grands stocks de carbone actifs du système « Surface Terrestre – Atmosphère » (STA), avec l'atmosphère et les océans. Les flux échangés entre océans et atmosphère (90 Gt C/an) sont du même ordre de grandeur que ceux échangés entre biomasse continentale et atmosphère (110 à 120 Gt C/an [Robert et Saugier, 2003] et Figure 2. 1).

Le flux anthropique net total (combustibles fossiles pour 7,5 Gt C/an environ, combustion des biomasses, y compris sous la forme de déforestation...), quoique de plus faible ampleur que les flux naturels (90 Gt C/an), n'est pas, quant à lui, directement compensé par un flux inverse.

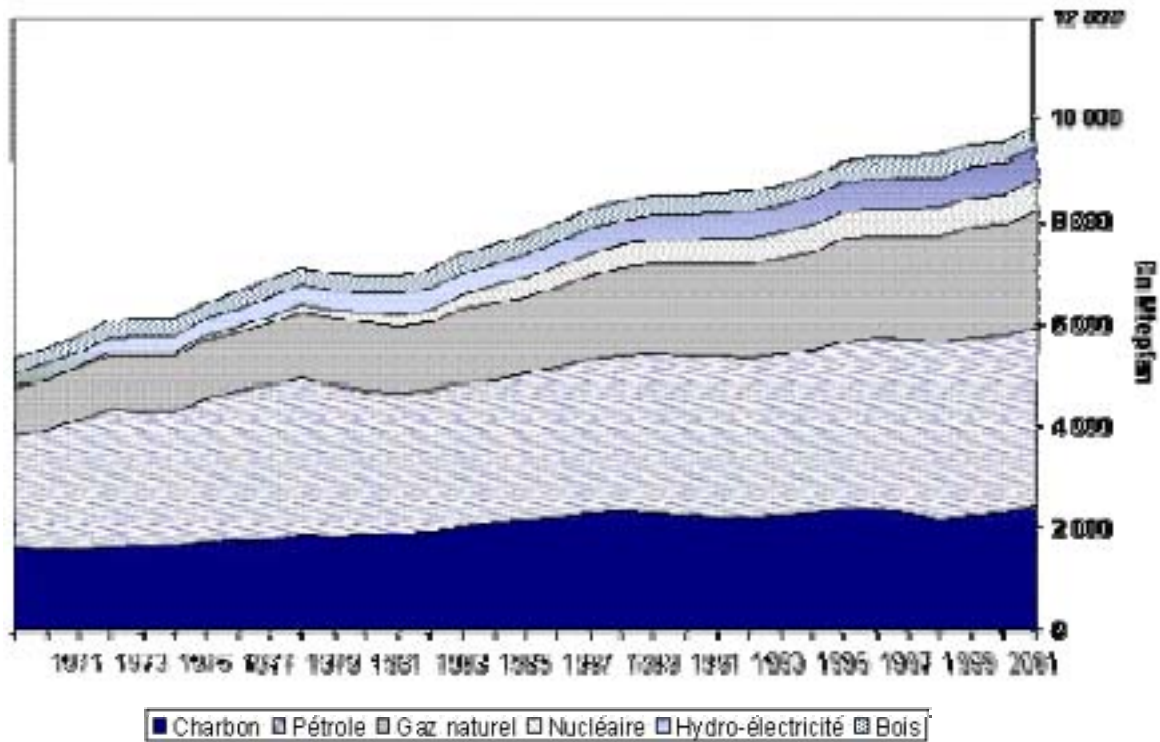


Figure 1.3 – Évolution des principales consommations explicites mondiales entre 1970 et 2002.

Sources des données : BP (normes internationales) pour les énergies conventionnelles (charbon, pétrole, gaz naturel, nucléaire et hydro-électricité) et FAOSTAT pour le bois énergie. Dans les deux cas, les données correspondent aux mises à jour de l'année 2004.

L'évaluation exhaustive du flux net de carbone émis dans l'atmosphère du fait des activités anthropiques est délicate, et nécessite en tout cas que les flux pris en compte ou non dans les estimations soient clairement explicités. Ainsi, le flux cité ici, de 9 Gt C/an, comprend les émissions issues de la consommation d'énergie primaire d'origine fossile (Figure 1.4) et le bilan net des évolutions des surfaces de forêts. Le prélèvement du bois en forêt pour la production n'est pas comptabilisé dans le flux anthropique. Il est supposé ici implicitement que ce prélèvement est compensé, en première approximation, par la croissance des forêts replantées pour la production de bois. Dans certaines évaluations, ce flux peut être comptabilisé dans les émissions nettes attribuées aux activités anthropiques.

En ce qui concerne les biomasses forestières, de nombreuses questions se posent :

- Quel est le bilan net des échanges de tous types des forêts avec l'atmosphère ?
- Comment comptabiliser dans le flux anthropique le prélèvement du bois en forêt pour des usages autres que combustibles ?
- Quelle est la contribution des flux de croissance des forêts replantées ?

1.3.2 Intensification de l'effet de serre

Le flux anthropique net de carbone vers l'atmosphère constitue un terme source qui vient perturber le cycle naturel du carbone (Figure 1.5), en provoquant un accroissement annuel net de la concentration atmosphérique en carbone. L'effet de serre naturel va donc être intensifié du fait de ces émissions. La mesure de l'intensification de l'effet de serre se fait généralement en équivalent CO₂, dans la mesure où le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre (GES) le plus présent en proportion dans l'atmosphère, à l'exception de l'eau qui figure dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et dans les nuages. Il est important de noter que la contribution d'autres GES, comme le méthane ou le N₂O est également importante, même si les taux d'émissions de ces autres gaz sont très inférieurs à celui du CO₂.

La prise en compte des autres gaz doit intégrer un pouvoir de réchauffement global (PRG), calculé en référence au CO₂ pour lequel le PRG est pris égal à 1. Le calcul du PRG tient compte du fait que les concentrations atmosphériques des différents gaz sont faibles, et que l'ajout d'une petite quantité de chacun de ces gaz, aura une influence plus importante sur l'effet de serre que l'ajout de la même quantité de CO₂. Pour chacune des molécules de gaz à effet de serre, l'absorption du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre s'effectue pour des plages de longueurs d'ondes différentes : chaque molécule gazeuse absorbe une partie du spectre, mais au-delà d'un certain seuil de concentration pour une même molécule, toute la partie du spectre potentiellement atteinte est effectivement absorbée et l'ajout de molécules du même type n'a plus d'influence. C'est ainsi que les émissions de la même masse de méthane ou de CO₂ auront des conséquences radicalement différentes sur l'intensification de l'effet de serre.

Les émissions de gaz à effet de serre, à l'échelle globale, sont constituées principalement de CO₂ et de CH₄, c'est pourquoi une plus grande importance est donnée à ces deux gaz, et parmi eux deux au dioxyde de carbone en particulier. Sans exclure la possibilité d'une émission massive de méthane, dans un scénario extrême, par exemple du fait de la fonte du permafrost, la plus grande partie des émissions actuelles est émise sous forme de dioxyde de carbone, d'où la concentration des efforts de réduction d'émissions sur ce gaz en particulier.

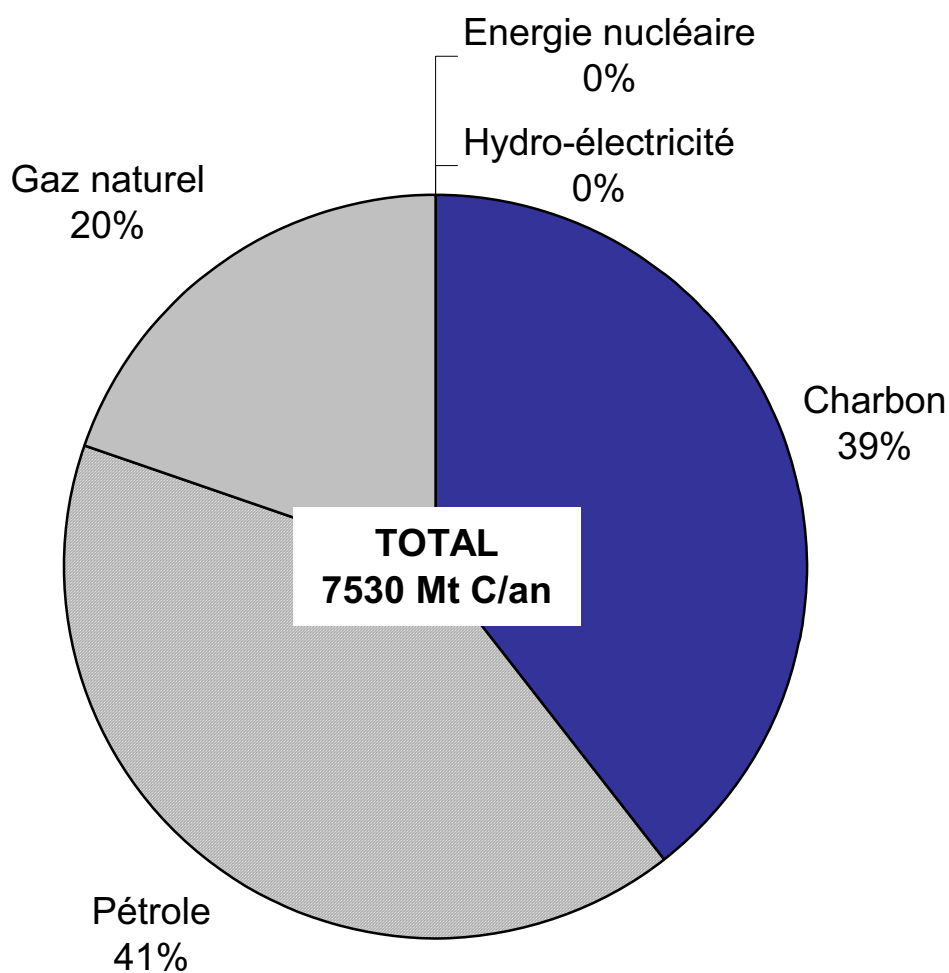


Figure 1.4 – Origine des 7,5 Gt de carbone provenant, pour l'année 2002, des combustibles fossiles, soit en équivalent CO₂, environ 27,6 Gt/an. Les quantités de carbone émises par chaque type d'énergie ont été calculées pour les consommations relatives à l'année 2002, sur la base des coefficients suivants [Sokona *et al.*, 1998] : 1,24 tC/tep pour le charbon, 0,87 tC/tep pour le pétrole, 0,65 tC/tep pour le gaz naturel et 0 tC/tep pour le nucléaire et l'hydro-électricité (uniquement pour les émissions en fonctionnement, en supposant que les émissions dues à la mise en place des infrastructures sont négligées).

1.3.3 Principe d'économie et principes de précaution

Une première remarque s'impose à ce stade. Quelles que soient les appréciations quantitatives sur leur ampleur, les ressources fossiles sont nécessairement limitées et un principe, qui pourrait être qualifié de « principe d'économie », doit conduire à restreindre au maximum l'appel à ces ressources. Cette attitude est d'ailleurs tout à fait cohérente avec le souci de réduire au maximum les apports humains à l'effet de serre.

Lorsque l'on constate le rôle prédominant des combustibles fossiles « carbonés » dans les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, une seconde remarque s'impose, complétant, d'une manière essentielle, le panorama énergétique. Participant d'un principe général, souvent qualifié de « principe de précaution », ou plus exactement d'un ensemble d'attitudes, de règles et de principes, elle consiste à mettre en avant, tout à la fois, les nécessaires progrès en matière de réduction des émissions de gaz carbonique (cette attitude est, de surcroît, parfaitement compatible avec le principe d'économie) et la mise en oeuvre de techniques de capture et de stockage du gaz carbonique.

Une analyse exhaustive des consommations d'énergie mobilisées pour la création de systèmes énergétiques et pour leur fonctionnement quotidien, fait très souvent apparaître le rôle de différents vecteurs énergétiques dans le processus tout entier. Ainsi, par exemple, dans un bilan écologique complet, il convient de prendre en compte qu'un barrage, une centrale nucléaire ont mobilisé des combustibles carbonés lors de la mise en oeuvre de certains matériaux, le ciment entre autres.

En ne prenant en compte que le seul fonctionnement utilisant les principales sources d'énergie et donc sans considérer la contribution du bois énergie, les seuls responsables des émissions anthropiques de gaz carbonique dans le système « Surface Terrestre – Atmosphère » sont, par ordre d'hydrogénation croissante, le charbon, le pétrole et le gaz naturel (Figure 1.4).

1.4 LES DIFFÉRENTS MODES DE STOCKAGE DE CARBONE

Il y a lieu de préciser d'emblée que la démarche la plus efficace, pour réduire les consommations énergétiques et l'augmentation de l'effet de serre, est, bien sûr, le contrôle le plus rigoureux des dépenses énergétiques, et la recherche de la manière la plus efficace d'utiliser les différentes sources d'énergie (amélioration des rendements...).

Mais, dans la mesure où la tendance lourde qui semble être une des plus probables est, à court et moyen termes, celle qui a été indiquée précédemment, il convient alors, pour mieux contrôler l'influence des consommations d'énergie sur la répartition des stocks de carbone dans le système « Surface Terrestre – Atmosphère », et pour limiter l'intensification de l'effet de serre, d'envisager le recours à des systèmes de piégeage du gaz carbonique.

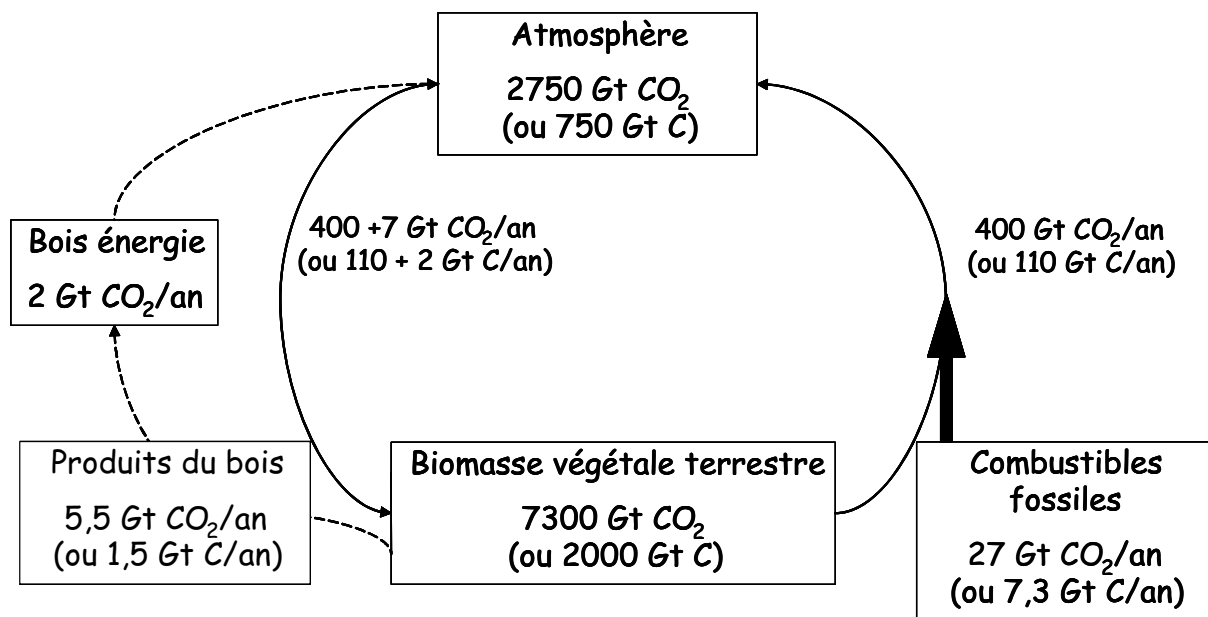


Figure 1.5 – Cycle du carbone dans trois compartiments du systèmes « STA » (le système complet comprend aussi les océans) : l’atmosphère, la biomasse végétale terrestre et les combustibles fossiles. Cette représentation correspond aux données relatives à l’année de référence 2002, déjà utilisée dans les figures précédentes.

Parmi les méthodes explorées actuellement, se distinguent :

- Le stockage dans les océans : soit physique, par injection du CO₂ en profondeur, soit biologique par forçage du stockage « naturel » (photosynthèse par le phytoplancton favorisée par la fertilisation au fer,...), sur lequel de premières réflexions se développent,
- Les modes de capture, physique ou chimique, sur les sites de production d'énergie, et de stockage géologique : gisements de pétrole ou de gaz déplétés, veines de charbon, aquifères salins,....
- Enfin, le stockage biologique terrestre, bien adapté à la séquestration du carbone associé aux émissions diffuses : changement d'allocation des sols, afforestation, reforestation, produits du bois.

Ces différentes méthodes sont décrites maintenant, regroupées en deux catégories : les méthodes dites « concentrées », permettant de capturer et stocker des flux importants de carbone émis, et celles dites « diffuses », qui peuvent stocker le carbone quelle que soit l'origine du flux d'émissions.

1.4.1 Les modes de stockage concentré

Le stockage de carbone dit « concentré » est destiné aux sources d'émissions de carbone les plus massives, c'est-à-dire notamment les centrales de production d'énergie et certaines installations de production industrielle particulièrement émettrices (cimenteries, production de métal...). Les techniques de capture et de stockage concentrés peuvent alors s'appliquer, en injectant le carbone récupéré dans le sous-sol, voire dans les couches profondes des océans. Ce type de stockage ne peut bien sûr pas être utilisé pour les émissions diffuses de carbone, pour des raisons à la fois techniques et économiques.

Il convient tout d'abord de fixer des critères objectifs pour apprécier la part d'émissions concentrées et la part d'émissions diffuses dans le bilan total des émissions de carbone. La limite entre ces deux formes d'émissions est relativement floue, et il n'existe pas réellement de définition quantitative précise universellement admise. Il s'agit donc de proposer un mode de calcul objectif, utilisé pour quantifier ces émissions.

Trois types de critères quantitatifs peuvent être appliqués :

- Des critères techniques : la capture et le stockage concentrés du carbone ne s'appliquent actuellement qu'à des installations de production d'énergie ou des installations industrielles, mais pas à des systèmes plus dispersés comme les transports, les installations de chauffage individuelles, etc. Ne pourront donc être considérées comme concentrées que les émissions issues d'installations d'une certaine ampleur.
- Des critères économiques : les dispositifs de capture et de stockage de carbone ont un coût important et induisent une augmentation du coût de l'énergie produite ou du produit industriel fabriqué. Actuellement, pour les installations de production d'énergie, un seuil est fixé pour le coût par tonne de CO₂ capturée, qui limite implicitement les systèmes de capture concentrée à des installations au-dessus d'un certain seuil d'énergie produite. Cependant, ce type de critère est relativement variable et donc difficilement mis en œuvre, c'est pourquoi il ne sera pas retenu dans la suite de ce travail.

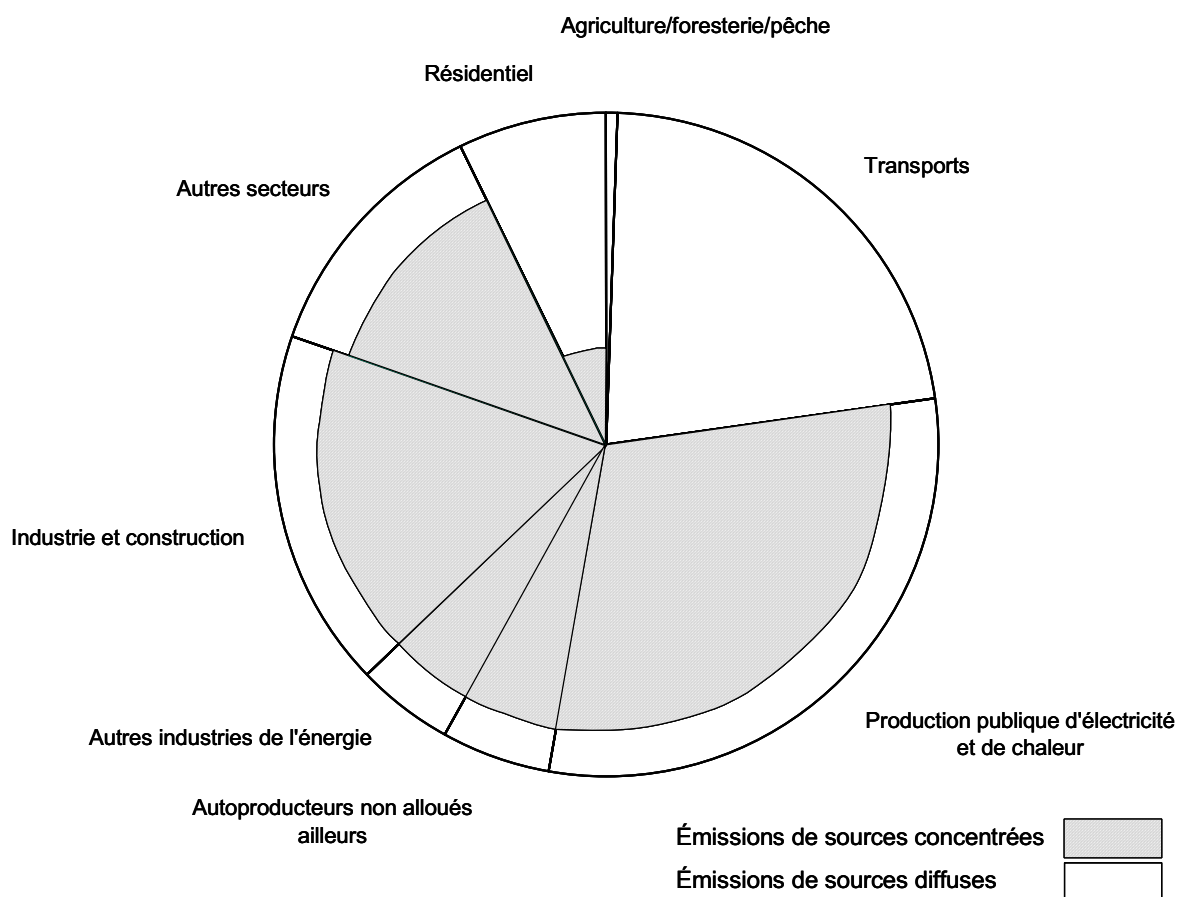


Figure 1.6 – Répartition des émissions mondiales de CO₂ liées aux consommations d'énergies conventionnelles entre émissions diffuses et émissions concentrées, pour des émissions de 7,5 Gt C/an, correspondant à l'année 2002. Le mode de répartition entre les émissions diffuses et les émissions concentrées est détaillé dans le texte.

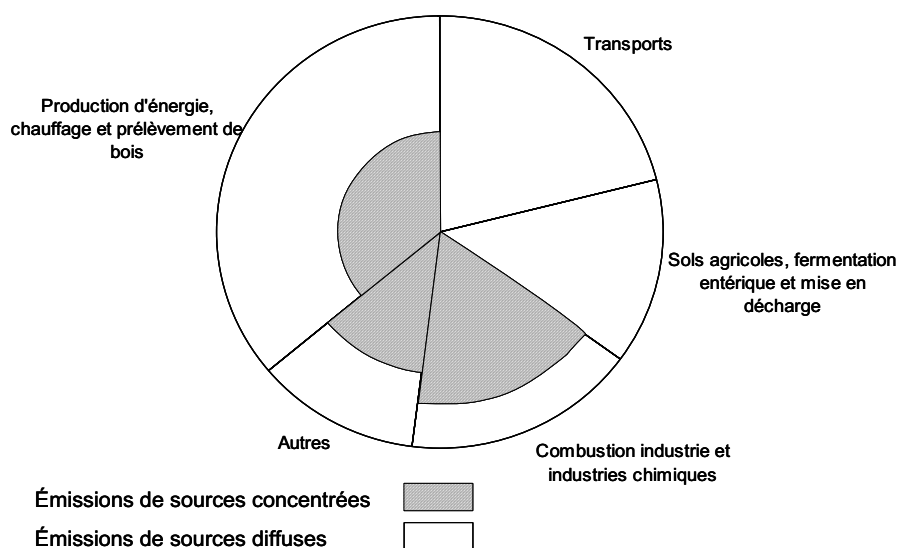


Figure 1.7 - Répartition des émissions françaises de CO₂ entre émissions diffuses et émissions concentrées. En 2002, le total des émissions s'élevait à 554 Mt CO₂.

- Des critères réglementaires : dans le cadre de la mise en application des accords de Kyoto, une directive européenne prévoit d'imposer des quotas d'émissions aux différentes industries. Cette directive ne s'applique pas à toutes les industries, et s'appuie en particulier sur les critères de production précis. Ainsi, les industries suivantes seront concernées :
 - Combustion : installations de puissance thermique supérieure à 20 MW,
 - Raffineries et cokeries, sans seuil de puissance ou de production,
 - Production d'acier et de fonte, pour des productions supérieures à 2,5 t/h,
 - Production d'autres métaux, sans seuil de production,
 - Production de ciment, au-dessus de 500 t/jour,
 - Production de chaux, au-dessus de 50 t/jour,
 - Production de verre, au-dessus de 20 t/jour,
 - Production de produits céramiques par cuisson, au-dessus de 7,5 t/jour,
 - Production de papier et carton, au-dessus de 20 t/jour,
 - Production de pâte à papier, sans seuil de production.

À l'échelle de la planète, l'application des critères techniques et réglementaires (en étendant les critères réglementaires en vigueur dans l'Union Européenne à l'ensemble du monde), est relativement délicate, dans la mesure où les données sont difficilement disponibles au niveau de précision défini par les critères.

Pour l'élaboration des figures 1.6 et 1.7, les parts relatives des émissions concentrées et diffuses à l'échelle globale sont donc plutôt évaluées en première approximation comme des intervalles possibles. Les émissions liées aux transports, à la pêche, ainsi que celles des secteurs agricoles et forestiers sont considérées systématiquement comme des émissions diffuses. Dans le cas du secteur résidentiel, une part estimée à ¼ des émissions du secteur est affectée aux émissions concentrées, pour tenir compte de cas éventuels où la production de carbone pourrait être suffisamment concentrée pour être captée par des méthodes physiques (réseaux de chaleur par exemple). Les émissions liées à la production publique d'électricité et de chaleur sont allouées aux ¾ aux émissions concentrées pour tenir compte d'une part d'émissions diffuses correspondant aux petites productions. Dans le cas de l'auto-production d'énergie, les émissions sont réparties également entre émissions concentrées et émissions diffuses. Le secteur de l'industrie et de la construction est supposé émettre en majeure partie de façon concentrée, à 75 %, de même que les « autres industries de l'énergie », qui comprennent en particulier les raffineries et les cokeries. Enfin, le solde des émissions, non allouées ailleurs, est réparti également entre les deux types d'émissions. Ces différentes hypothèses conduisent aux estimations de la part des émissions concentrées et diffuses représentées Figure 1.6. Les émissions annuelles sont donc pratiquement également réparties entre émissions diffuses et émissions concentrées à l'échelle globale.

Dans le cas de la France, les agrégats sont connus de manière plus précise, ce qui permet d'affiner l'évaluation, et de s'approcher au mieux des critères en particulier réglementaires définis précédemment [Fontelle, 2003]. Ainsi, les émissions liées à la production de ciment, de fer et d'acier, au raffinage du pétrole et à la fabrication de pâte à papier et de papier, bien connues, sont considérées intégralement comme des émissions concentrées, dans la mesure où la répartition précise entre les niveaux de production unitaire n'est, elle, pas connue. Les résultats de ces répartitions sont récapitulés Figure 1. 7. Dans ces conditions, pour l'année 2002, la part diffuse des émissions de CO₂ en France est significativement plus importante, environ 62 % du total des émissions, que la part concentrée, équivalente elle à environ 38 %.

Tableau 1.1 – Capacités mondiales estimées de stockage concentré du CO₂, d’après [Jean-Baptiste et Ducroux, 2003]

Réservoir	Capacités mondiales (Gt CO ₂)	Flux annuels maximaux (Gt CO ₂)	Nombre d’années* d’émissions correspondantes
Aquifères salins profonds	500–10000	13,5	18–360
Gisements gaziers et pétroliers	500–3000	13,5	18–110
Océan profond	> 5000	13,5	> 180

* au rythme actuel d’émissions, soit 27,6 Gt CO₂/an

Tableau 1.2 - Capacités mondiales estimées de stockage diffus du CO₂. Les capacités mondiales correspondant aux biomasses terrestres sont issues de la comparaison d’un grand nombre d’estimations. Le stock maximum capté potentiellement par la biomasse océanique est issu de Jones, 1996, et le flux annuel de Jones et Otaegui, 1997.

Réservoir	Capacités mondiales (Gt CO ₂)	Flux annuels maximaux (Gt CO ₂ /an)	Nombre d’années* d’émissions correspondantes
Biomasse terrestre	20–1800	2.10 ⁻³ –37	1–65
Biomasse océanique	4000	2.10 ⁻³	148

* au rythme actuel d’émissions, soit 27,6 Gt CO₂/an

Les techniques de capture du CO₂ sont d'ores et déjà des techniques industrielles mises en place, que ce soit dans le domaine de l'énergie, de la chimie ou de l'agro-alimentaire [Jean-Baptiste, 2002, Jean-Baptiste et Ducroux, 2003]. La capture peut se faire soit par voie physique, soit par voie chimique et correspond à des procédés mis en œuvre après la combustion ou en préparation à cette combustion (oxycombustion par exemple). L'efficacité de la capture seule est comprise entre 80 et 90 %. Le carbone est ensuite transporté puis stocké, soit en sous-sol, soit dans les nappes profondes des océans.

Les techniques de capture et stockage concentrés présentent l'avantage de constituer des stocks d'une durée de vie pratiquement infinie, en supposant que les termes de fuite des réservoirs souterrains sont négligeables (Tableau 1.1). En revanche, leur principal défaut est leur surcoût, économique mais surtout énergétique, puisque la mise en place de ce type d'installation induit une perte de rendement non négligeable pour les centrales de production d'énergie (de l'ordre de 10 points).

1.4.2 Les modes de stockage diffus

La capture et le stockage diffus du carbone sont basés sur l'utilisation de la photosynthèse, que ce soit dans la biomasse océanique ou terrestre. Ce mode de stockage fonctionne indifféremment pour les émissions concentrées ou diffuses, mais est incontournable en l'état actuel des connaissances pour capter les émissions qui ne peuvent pas l'être par des modes de stockage concentrés (Tableau 1. 2).

Le stockage dans la biomasse océanique présente un potentiel important, car les flux de phytoplancton sont considérables, et avec eux les flux de sédimentation potentiels. L'augmentation du stockage naturel dans des proportions assez faibles pourrait en théorie conduire à un stockage considérable. Cependant, les modalités de mise en place de ce genre de stockage sont relativement complexes (fertilisation des océans...) et les processus complets semblent actuellement difficilement maîtrisables.

L'utilisation des biomasses terrestres apparaît alors comme une voie plus facilement contrôlable par l'Homme. Tous les écosystèmes terrestres sont susceptibles de stocker une quantité de carbone plus ou moins importante. Deux grandes voies d'action sont possibles, l'augmentation des surfaces les plus productives ou l'amélioration du stockage en place par de meilleures pratiques culturales.

Le rôle du bois, ou de tous autres produits ligno-cellulosiques, est en fait triple. D'une part, les écosystèmes forestiers sont, a priori, les plus adaptés à la capture et au stockage du carbone diffus [Prieur et Rauch, 2003]. D'autre part, l'utilisation aussi étendue que possible du « bois combustible » contribue à stabiliser le recours aux combustibles fossiles carbonés (Figure 1.5) [Prieur et Combarrous, 2003] : la substitution du bois a donc deux effets, un effet direct lorsque le bois est utilisé pour la production d'énergie à la place de combustibles fossiles et un effet indirect lorsqu'il est utilisé à la place d'autres matériaux plus coûteux en énergie, par exemple dans la construction ou l'ameublement (aluminium, acier, etc.), et dans ce cas le bois constitue également un stock de carbone supplémentaire.

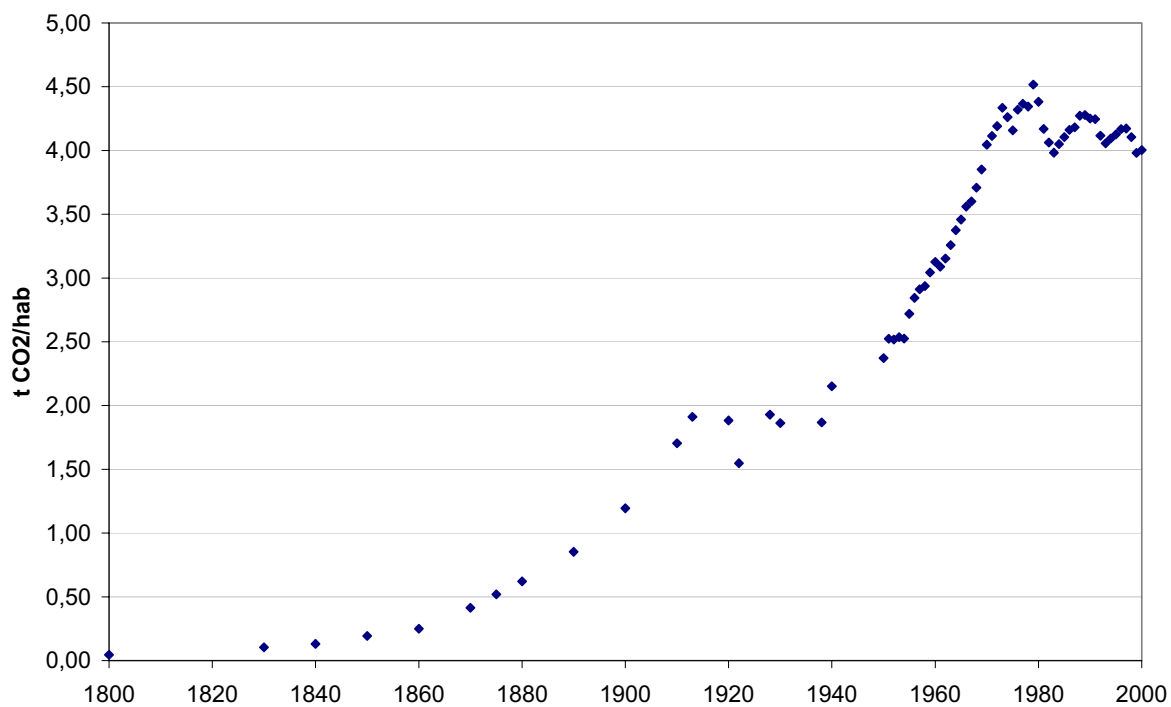


Figure 1. 8 - Évolution des émissions de dioxyde de carbone par habitant depuis 1800, exprimées en t CO₂/hab. Les données correspondant aux émissions sont issues de [Wigley et Schimel, 2000] et les données relatives à la population proviennent des statistiques de la FAO et de [Etemad et Luciani, 1991]. Sur les 30 dernières années, le taux individuel d'émissions de dioxyde de carbone semble diminuer : cela traduit le fait que la consommation d'énergie primaire individuelle reste constante, mais que la redistribution entre les énergies fossiles carbonées, en particulier entre le charbon et le gaz naturel, évolue en faveur des combustibles les plus hydrogénés.

1.5 ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION

À ce stade, plusieurs éléments importants apparaissent. Dans un contexte où les consommations d'énergie vont croissant, le principe d'économie semble devoir s'imposer. La consommation individuelle d'énergie, constante depuis quelques décennies et égale à environ 1,5 tep/hab, implique une augmentation des consommations totales d'énergie, du fait de l'augmentation de la population mondiale, s'élevant aujourd'hui à plus de 6 milliards d'habitants. Si les émissions de dioxyde de carbone par habitant semblent pouvoir se stabiliser à l'échelle mondiale (Figure 1. 8), elles sont toutefois encore très élevées et, la population croissant, le total des émissions annuelles continue lui aussi d'augmenter. Ainsi, à court et moyen termes, le principe d'économie ne suffit pas seul à résoudre le problème de l'augmentation de la concentration atmosphérique en carbone, qui est passée de 280 à 360 ppm entre 1800 et 2000, avec un rythme d'accroissement annuel actuel d'environ 1,5 ppm/an ces vingt dernières années, d'où la nécessité des méthodes de capture et stockage de carbone.

Deux aspects doivent être pris en compte pour estimer les potentiels de capture et stockage par les deux méthodes décrites précédemment :

- d'une part les stocks maximaux qui peuvent être constitués,
- et d'autre part les flux maximaux qui peuvent être captés chaque année.

Dans le cas des modes de stockage concentrés, les stocks potentiels sont très importants, mais le facteur limitant est celui du flux annuel potentiellement capté, limité actuellement aux émissions les plus concentrées, pour des raisons à la fois technologiques et économiques. En revanche, dans le cas du stockage biologique, en excluant la possibilité d'utiliser la biomasse océanique, du fait de la difficulté à contrôler son utilisation, le facteur limitant est plutôt le stock maximum envisageable.

Il apparaît donc, que dans un paysage où les consommations énergétiques vont croissant, le rôle des biomasses en général, qui représentent un stock de carbone de presque 2500 Gt C, et en particulier des forêts, doit être pris en compte dans le cadre de la mise en œuvre de tous les moyens possibles de lutte contre l'intensification de l'effet de serre.



Le châtaignier (*Castanea sativa*) couvre en France une surface de 0,8 Mha.

2. LES BIOMASSES FORESTIÈRES ET LEURS POTENTIELS

2.1. LES SURFACES BOISÉES ET LE CYCLE DU CARBONE

2.1.1. Bilans et évolutions

Il existe plusieurs définitions des surfaces forestières, selon les critères retenus (hauteur des arbres, densité et étendue du couvert). Les données utilisées ici se rapportent à la définition de la FAO : une forêt comporte un couvert arboré supérieur à 10 % de la surface, elle-même supérieure à 0,5 hectare [FAO, 2001]. Les surfaces boisées forment l'essentiel de la biomasse végétale continentale (Figure 2. 1).

Le stock global de carbone (Tableau 2. 1) évolue selon diverses contributions, concourantes ou opposées : (i) variations de surfaces, positives (boisement, reboisement, expansion naturelle des forêts), ou négatives (déforestation, catastrophes naturelles), (ii) variations de densité moyenne (stock sur pied, sol) liées aux pratiques culturales ou à des effets naturels. L'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂ a un effet « fertilisant » sur les forêts, dont l'ampleur globale est mal connue du fait du rôle des autres facteurs limitants (eau, température, nutriments minéraux...). Actuellement, la surface de forêt s'élève à 3870 Mha, soit 25 % des terres émergées totales, et presque 29 % en excluant l'Antarctique. À titre de comparaison, les déserts s'étendent sur environ 3460 Mha et les terres arables et cultures permanentes sur 1495 Mha [FAOSTAT, 2004].

Sur cette surface, la situation présente peut sembler paradoxale : alors que les surfaces diminuent (colonne 13 du tableau 2.1), le stock sur pied, lui, paraît augmenter (colonne 14 du tableau 2.1). Cet état n'est évidemment pas pérenne et est sans doute lié au fait que les surfaces déboisées actuellement sont parmi les moins productives en termes d'accroissement de biomasse, parce qu'elles correspondent souvent à des systèmes proches du climax. Il convient également de rappeler que cette remarque ne concerne que le stock contenu dans le bois sur pied, et pas tout le stock de carbone de l'écosystème, comprenant également le carbone dans le sol.

En matière de produits des forêts, une attention particulière est souvent apportée à la production de bois rond, qui constitue 1/12^{ème} de l'incrément annuel de biomasse environ. À l'échelle mondiale, plus de la moitié de la production brute de bois rond est destinée aux usages énergétiques (bois de feu, charbon de bois), l'autre moitié couvrant les usages industriels du bois (Figure 2. 3). Une grande part est utilisée pour les sciages et placages. La transformation, à faible rendement matière, produit d'importants volumes de déchets, partiellement valorisés sous forme d'énergie ou de matière première pour trituration. Le rôle du bois dans le cycle du carbone est triple :

- la récolte non transformée constitue un stock tampon qui prolonge le stockage global du carbone, et l'utilisation du bois en substitution a à la fois :
- un effet direct, lorsqu'il est utilisé sous forme d'énergie à la place des énergies fossiles,
- et un effet indirect, lorsqu'il est utilisé en substitution à d'autres matériaux plus coûteux en énergie (ciment, aluminium...) et qu'il permet donc à la fois d'économiser les ressources énergétiques non renouvelables et de modérer l'intensification de l'effet de serre.

Tableau 2. 1 - Bilan des ressources forestières mondiales et de leur utilisation

	Surface de forêts (milliers d'ha)			Plantations milliers d'ha	Stock de bois sur pied				Récolte bois indus Mm ³ /an	Récolte bois de feu Mm ³ /an	Récolte totale Mm ³ /an	Récolte moy. à l'hectare m ³ /(ha.an)	Modification de surface 10 ³ ha/an	Accroissement naturel tC/(ha.an)	Sources pour l'acc. nat.
	Protégées	Productive	Total		Volume		Biomasse								
					m ³ /ha	Mm ³	t/ha	Mt							
<i>Afrique</i>	76642	573224	649866	8038	72	46472	109	70917	182	528	710	1,1	-5262	1,5	Smil, 1991
Afrique du Nord	429	5833	6262	1693		189		334	0	26	26	4,2	34	-	
Afrique de l'Ouest	10772	74307	85079	1710		5181		8628	99	155	254	3,0	-1352	-	
Afrique de l'Est	20103	115320	135423	1291		3782		5185	2	190	193	1,4	-1358	-	
Afrique Centrale	25417	202594	228011	634		28986		44689	80	91	171	0,7	-852	-	
Afrique du Sud	18921	174933	194854	2601		8274		14072	1	65	66	0,3	-1740	-	
Îles diverses	0	237	237	107		20		29	0	0	0	0,2	4	-	
<i>Asie</i>	50140	497653	547793	115847	63	34506	82	45062	362	770	1131	2,1	-364	2,4	
Ouest de l'Asie	2772	24503	27275	5073		2775		2403	17	9	26	1,0	48	2,6	ERF, 2000
Centre de l'Asie	3690	26230	29920	384		1850		1081	1	0	2	0,1	209	2,6	ERF, 2001
Sud de l'Asie	6841	68824	75665	34652		3763		5900	129	372	502	6,5	-87	2,6	ERF, 2002
Est de l'Asie	7327	194692	202019	55765		12617		12602	0	199	199	1,0	1804	1,5	Smil, 1991
Sud-Est de l'Asie	29510	182404	211914	19972		13501		23076	214	188	403	1,9	-2328	2,6	ERF, 2002
<i>Océanie</i>	23090	174533	197623	2848	55	10771	64	12640	23	12	35	0,2	-365	2,5	
Australie et N.-Zélande	20328	142157	162485	2938		9488		10586	20	6	26	0,2	-243	2,3	
Autres pays d'Océanie	2762	32376	35138	263		1273		2074	3	6	9	0,3	-122	2,6	
<i>Europe</i>	757771	281430	1039201	32015	112	116448	59	61070	484	113	597	0,6	881	3,6	
Nord	7821	57124	64945	1613		8841		3888	134	15	149	2,3	72	3,4	ERF, 2000
Centre de l'Europe	250	51630	51880	4114		11482		8091	174	26	200	3,9	153	7,1	ERF, 2000
Est	749000	121703	870703	21961		92333		48199	126	55	181	0,2	423	1,4	ERF, 2000
Sud	700	51023	51723	4327		5782		2892	50	17	67	1,3	233	2,5	ERF, 2000
<i>Amérique Nord et Centrale</i>	109945	439359	549304	17533	123	67329	95	52357	677	158	835	1,5	-570	2,7	
Amérique Nord et Mexique	102626	367938	470564	16238		60202		44688	686	77	743	1,6	388	2,7	Smil, 1991
Centre + Mexique	6444	68585	73029	729		6300		6799	11	76	86	1,2	-972	2,7	FAO, 1997
Caraïbes	875	4836	5711	566		827		890	0	6	6	1,1	14	2,7	FAO, 1997
<i>Amérique du Sud</i>	169248	716370	885618	10455	125	110826	203	180210	45	185	230	0,3	-3711	2,7	ERF, 2000
Tropicale	164583	668559	834142	6890		107474		173690	45	168	211	0,3	-3456	-	
Non tropicale	4665	48811	51476	3565		3352		6520	0	19	19	0,4	-255	-	
Monde	1786836	2682619	3869455	186734	108	386352	109	422256	1773	1766	3539	0,9	-9391	2,7	

2.1.2. Les écosystèmes forestiers et les dynamiques de stockage

Quelques notions de fonctionnement sont nécessaires pour appréhender le potentiel de stockage de différents types de systèmes forestiers. Le comportement d'un écosystème dépend des caractéristiques physico-chimiques du milieu et de la nature de la communauté biologique. Ces aspects peuvent évoluer librement, ou être modifiés par l'homme : maîtrise des facteurs limitants (eau, nutriments minéraux, qualité du sol...), contrôle des peuplements (choix d'espèces privilégiées, amélioration génétique des espèces). L'exploitation forestière elle-même influence, par la récolte principalement, le fonctionnement du système.

Les données initiales d'un site, nécessaires pour la description de la croissance d'un écosystème forestier, sont les suivantes : potentiel agronomique, stock initial de carbone ou de biomasse (exprimée en tonnes de matière sèche), nature du peuplement (adaptation des espèces, variété des peuplements, distribution par âges...), modalités de gestion. Ces données définissent une aptitude annuelle au stockage, exprimée comme un accroissement annuel net de carbone dans la biomasse (ΔB) ou de carbone total de l'écosystème ($\Delta SE = \Delta B + \Delta SEs$) – incluant la biomasse morte non encore décomposée dans le sol.

Le point de vue adopté ici est celui de l'énergéticien, ayant pour objectif principal d'optimiser le stockage de carbone dans les forêts. En conséquence, c'est bien la donnée de l'aptitude annuelle au stockage qui est le paramètre le plus pertinent in fine. Ainsi, l'ordre des définitions proposées peut s'avérer différent de celui généralement utilisé en foresterie ou en écologie d'une manière générale.

L'évolution du stockage peut être appréciée par diverses variables écologiques ou agronomiques (Tableau 2. 2) :

- le flux annuel de production de biomasse ($pB = PPN = \Delta B + LCM$) : plus réduites sont les pertes (LCM) par consommation et mortalité, plus grand est le stockage dans la biomasse,
- le taux de respiration autotrophe R_a : les végétaux des écosystèmes jeunes ou exploités ont des taux de respiration plus faibles que les systèmes matures,
- la production primaire brute ($PPB = pB + R_a$), représente la captation première de carbone dans l'atmosphère, ou le potentiel maximum de production de matière d'un écosystème,
- l'accroissement de carbone du sol (ΔSEs) : si l'activité des décomposeurs ne consomme pas tout le flux annuel de biomasse morte (chute de litière), il en résulte un accroissement net ΔSEs . Dans certains cas, le flux de carbone échangé entre le sol et l'atmosphère peut être un flux net d'émissions, en particulier lorsque la quantité de biomasse morte n'est pas suffisante pour alimenter l'activité des décomposeurs et que la décomposition s'effectue sur une quantité de biomasse supérieure au flux annuel. Cela peut être notamment le cas dans des écosystèmes jeunes, pour lesquels la mortalité est faible.

Parmi les régimes d'évolution d'un écosystème, on en considère schématiquement trois principaux :

- l'écosystème libre : à partir d'une situation initiale hypothétique (e.g. prairie naturelle), se développe un peuplement forestier colonisateur, produisant une biomasse importante et modifiant les caractéristiques du sol. Après un état transitoire, cette communauté évolue vers un stade d'équilibre, qui tend vers le climax, dont le bilan des flux est nul : la mortalité naturelle compense l'accroissement des arbres. Son aptitude annuelle au stockage apparaît alors donc nulle.
- L'écosystème géré ou entretenu, maintenu par l'exploitation dans un état particulier : il favorise une ou plusieurs espèces et stocke du carbone annuellement, du fait qu'il est maintenu en croissance. La récolte périodique des produits forestiers exporte des flux de carbone importants.

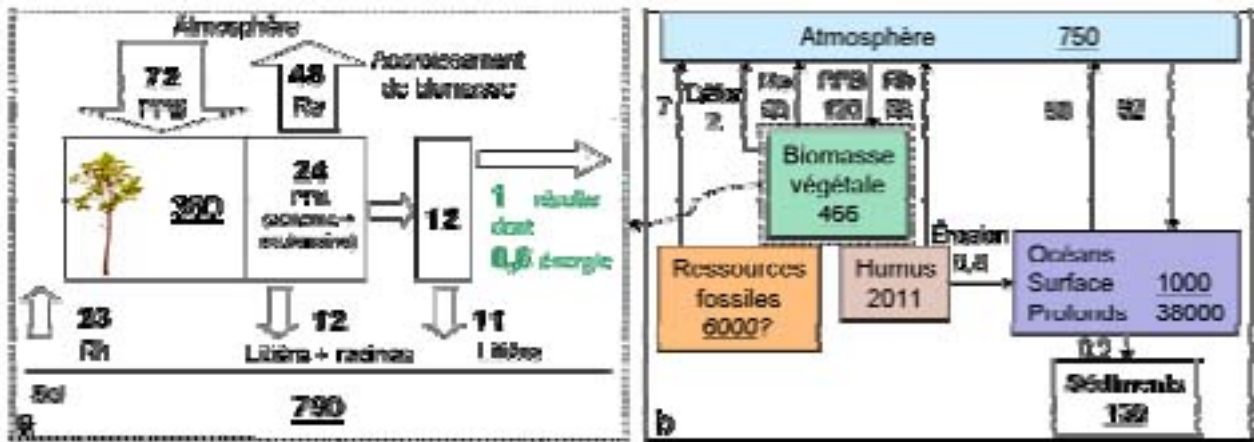


Figure 2. 1 - Stocks (Gt C) et flux (Gt C/an) de carbone (a) dans les seules forêts et (b) dans tous les compartiments du système « Surface terrestre – atmosphère ». Adapté de [Bonnet, 2001, FAO, 2001 et Robert et Saugier, 2003].

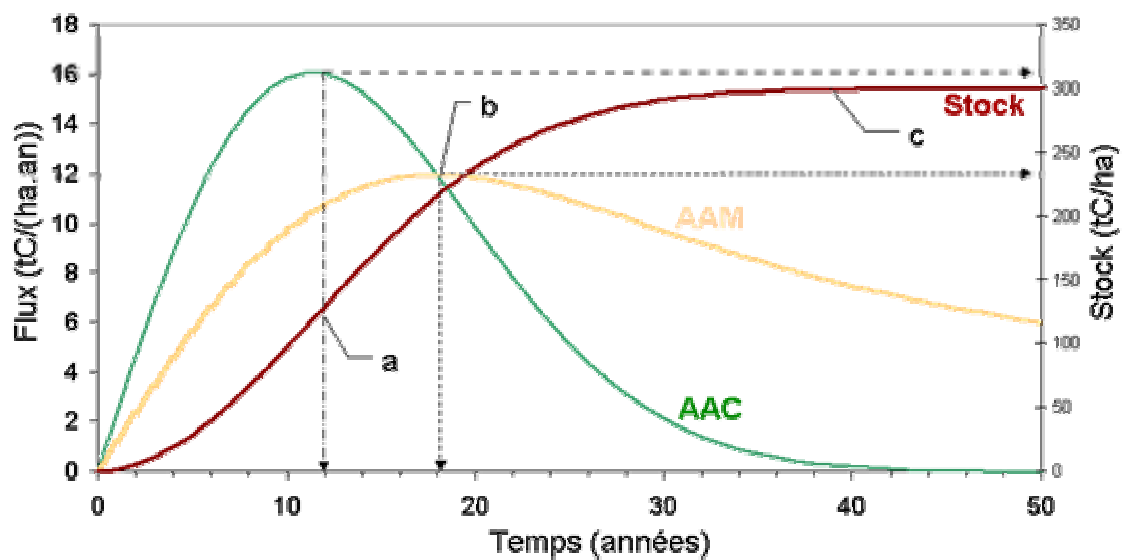


Figure 2. 2 - Stock et flux de carbone dans un écosystème forestier (boisement non exploité) : Accroissements Annuels Courant (AAC) et Moyen (AAM).

- l'écosystème de culture ou « artificiel » : regroupant les différents types de plantations, il connaît un contrôle anthropique maximal (sélection et amélioration des espèces, fertilisation et irrigation, lutte contre les parasites et les compétiteurs...). Les ordres de grandeur de la production primaire de biomasse ligneuse aérienne ($pBla$) et de l'exportation ($xBla$) sont les plus élevés, sur des surfaces parfois réduites mais fortement sollicitées (c'est le cas par exemple des taillis à courte rotation).

Dans le cas d'un écosystème géré, en culture, ou libre hors climax, il y a lieu de considérer différents stades de croissance d'un peuplement (Figure 2. 2) :

- le maximum de l'accroissement annuel courant AAC, point d'inflexion (a) qui traduit le pic de productivité primaire de l'écosystème,
- le maximum (b) de l'accroissement annuel moyen AAM, calculé chaque année comme le rapport du stock sur l'âge du peuplement,
- l'équilibre des flux, entretenu ou non, caractérisé par l'asymptote de la courbe de croissance figurant le stock sur pied au climax, correspondant au stock maximal de biomasse sur pied (c).

Les principales grandeurs pertinentes quant au stockage de carbone sont :

- les stocks dans la biomasse (B), et dans l'écosystème (SE), en fonction du temps,
- les variations annuelles de stockage (ΔB , ΔSE) en fonction du temps,
- le temps caractéristique de stockage : un écosystème a une capacité annuelle de stockage optimale pendant un temps caractéristique, compris entre 20 ans et 100 ans selon les conditions (sol, essences, modes de gestion).

2.1.3. Les produits du bois et les dynamiques de stockage

Dans la filière aval de la forêt, deux types de stocks sont à considérer :

- les stocks de produits finis de durée de vie supérieure à 1 an,
- les stocks circulants (stocks de matières premières, en-cours de production...) et les stocks de produits de durée de vie inférieure à un an, tous deux constituant des stocks dont l'influence sur le stock global dans les produits est faible.

L'aptitude annuelle au stockage est donnée par le bilan des flux de produits finis et de leur mise au rebut. Elle est nulle dans un marché de pur renouvellement où les déchets ne seraient pas valorisés énergétiquement. Tout potentiel de stockage supplémentaire repose sur :

- le développement de secteurs d'activité (construction, ameublement),
- des modifications structurelles de ces secteurs, accroissant les flux de produits ou leur temps de stockage (durées de vie, part relative des produits bois, nouvelles utilisations du bois),
- le développement d'activités reposant sur de fortes masses circulantes (e.g. en-cours de séchage) : bois énergie, papier-carton.

Les principales grandeurs pertinentes pour le stockage dans les produits du bois sont :

- les bilans des utilisations et les temps de renouvellement,
- les stocks en fonction du temps (P),
- le flux annuel de produits (pP), le bilan des utilisations et les temps de renouvellement,
- la variation annuelle de stockage en fonction du temps (ΔP),
- le temps caractéristique de stockage.

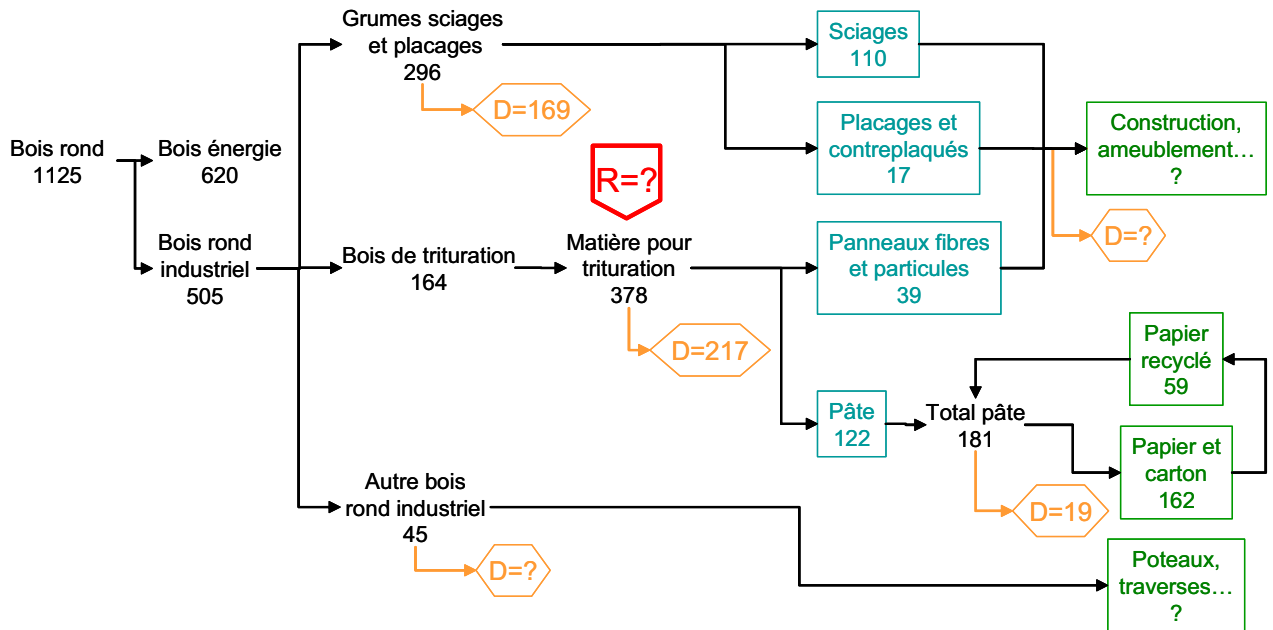


Figure 2. 3 - Bilan des utilisations du bois dans le monde (données FAOSTAT, année 2002), des déchets résultants (D) et de la part estimée des déchets recyclée dans la filière trituration (R), en Mt C/an.

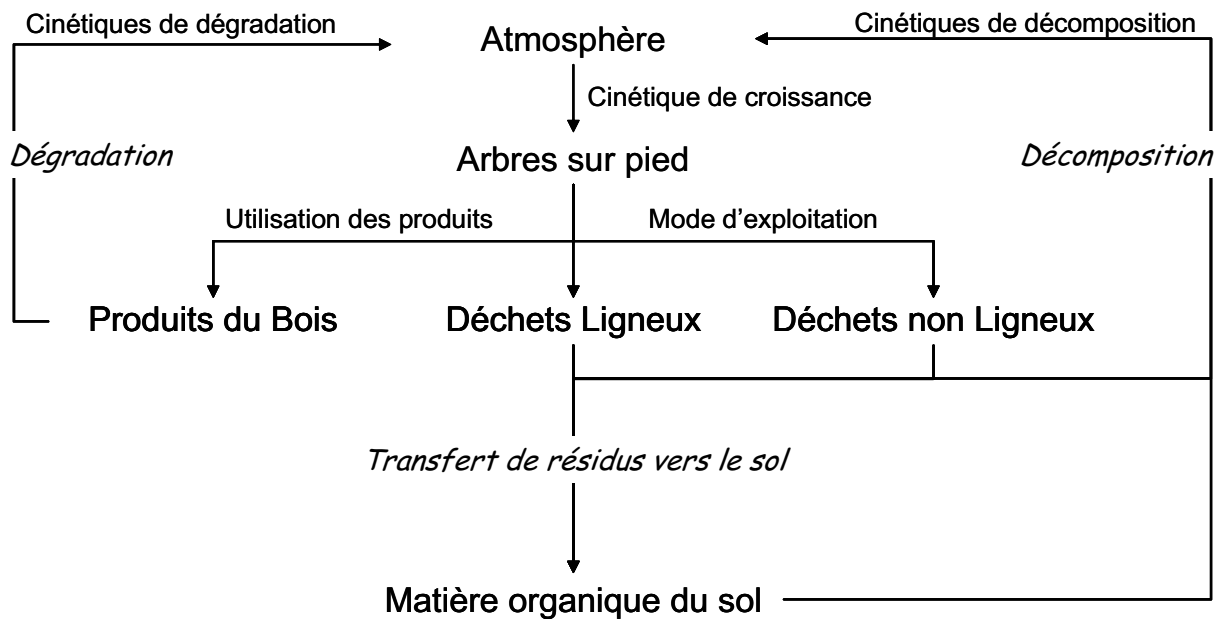


Figure 2. 4 - Les différents compartiments modélisés dans la dynamique de croissance des forêts [Dewar, 1991].

En 2001 le flux annuel mondial (Figure 2.3) de bois rond récolté est de presque 3,4 Gm³/an, soit 1,1 Gt C/an. Les produits de durée de vie supérieure à un an, hors bois énergie, représentent 0,5 Gt C. En moyenne mondiale, la durée de stockage dans les produits est proche de 27 ans, tenant compte de la contribution de chaque type de produits [Prieur et Combarrous, 2003] : construction et ameublement (40 ans), papier, carton, emballage (7 ans). Compte tenu de ces données, on évalue le stock actuel de carbone dans les produits du bois, en première approximation, à 32 Gt C, en faisant le produit des flux annuels de chaque produit du bois par la durée de vie.

2.2. CROISSANCE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

2.2.1. Échelles de description

D'une manière générale, plusieurs échelles de modélisation ou d'analyse peuvent être distinguées :

- L'échelle du processus (ou échelle de l'arbre), à laquelle sont décrits tous les phénomènes élémentaires intervenant dans la croissance de l'arbre (photosynthèse, respiration, translocation, utilisation de l'eau et des nutriments) [Barbault, 1995],
- L'échelle du territoire (ou du peuplement), à laquelle est décrit le comportement d'un peuplement seul (sans la filière aval),
- L'échelle globale, intégrant dans le cas des forêts toute la chaîne en aval de la production de bois.

Dans la présente étude, c'est généralement à l'échelle du territoire que sont décrits les compartiments. Le modèle complet, décrivant chaque processus élémentaire (photosynthèse, respiration, translocation, décomposition...), n'est abordé qu'à l'aide d'une courbe synthétique, la cinétique de croissance du peuplement. Dès lors que vont être examinées les dynamiques des écosystèmes forestiers, il est utile d'avoir à l'esprit quelques approches quantitatives permettant d'apprécier ces évolutions.

Comme pour le système général « Surface Terrestre – Atmosphère », le terme « compartiment » est utilisé ici pour désigner un ensemble susceptible de stocker du carbone (Figure 2. 4).

2.2.2. Modèles d'évolution des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers

a) Modèle de croissance des peuplements

Il est fréquent de faire appel aux fonctions de Richards pour décrire l'évolution de certains systèmes vivants, isolés ou en groupe. Par ailleurs, elles décrivent assez bien la plupart des peuplements forestiers et présentent l'avantage d'être facilement adaptées aux courbes de croissance des divers écosystèmes [Cooper, 1983]. Ces fonctions intègrent de manière implicite les variations du stock au cours du temps, c'est-à-dire le bilan net de la production primaire moins la mortalité.

L'intérêt de ce type de fonction est également de faire apparaître des paramètres qui ont un sens dans la biologie de l'arbre ou du peuplement.

Tableau 2. 2 - Une nomenclature des paramètres du stockage biologique de carbone.

Variables	Variable de stock	Flux annuels bruts	Variations annuelles nettes	Commentaires
Stocks (t, tC)				
1 Surfaces (m ² , ha)	A	-	ΔA	$A(n) = A(n-1) + \Delta A$
2 Densité de biomasse (s. dim.)	b	-	Δb	$2 = 3 / 1 ; b + \Delta b = (B + \Delta B)/(A + \Delta A)$ si A = Cte, Δb = ΔB/A
3 Stock de biomasse	B	pB	ΔB	3 = 4 + 5
4 Biomasse non ligneuse	Bnl	pBnl	ΔBnl	Bnl a une durée de vie < 1 an (feuilles, rameaux...)
5 Biomasse ligneuse	Bl	pBl	ΔBl	5 = 6 + 10 ; Bl a une durée de vie > 1 an
6 Aérienne	Bla	pBla	ΔBla	6 = 7 + 8
7 diam < 7 cm	Bla7-	pBla7-	ΔBla7-	
8 diam > 7 cm	Bla7+	pBla7+	ΔBla7+	$pBla7+ = (\Delta Bla7+) + (L1+) + M$
9 tronc	Btr	pBtr	ΔBtr	9 inclus dans 8 ; pBtr = ΔBtr + M
10 Souterraine	Bls	pBls	ΔBls	Bs : racines, pBs : production racinaire ΔBs : accroissement racinaire
11 Biomasse récoltable	Br	pBr	ΔBr	10 = 6 ou 8 selon utilisations
12 Stock de l'écosystème (tC)	SE	-	ΔSE	12 = 13 + 14
13 Stock de C du sol (tC)	SEs	-	ΔSEs	SEs = biomasse morte du sol ΔSEs = L + M - D
14 Stock de C de la biomasse	B	-	ΔB	14 = 3 ; inclut biomasse aérienne et souterraine, distincte du stock du sol
Capacité de production (t/an, tC/an)				
15 Incrément annuel de biomasse	-	-	ΔB	
16 Incr. annuel de biomasse récoltable	-	-	ΔBr	
17 Bois matériau	-	-	ΔBla7+	
18 Bois énergie	-	-	Δbla	
Capacité de stockage (t/an, tC/an)				
19 Stockage dans tout l'écosystème	-	-	ΔSE	
20 Stockage dans la biomasse	-	-	ΔB	
21 Stockage dans le sol	-	-	ΔSEs	
Variables écologiques (t/an, tC/an)				
22 Production Primaire Brute	-	PPB	-	PPB = PPN + Ra
23 Production Primaire Nette	-	PPN = pB	-	PPN = pBnl + pBl
24 Production nette de l'écosystème	-	-	PNE	PNE = PPB - R = PPN - Rh
25 Respiration	-	R	-	R = Ra + Rh
26 Respiration autotrophe	-	Ra	-	
27 Respiration hétérotrophe	-	Rh	-	Régime permanent : Rh = LCM
28 Litière, consommation, mortalité	-	LCM	-	LCM = L + C + M
29 Chute de litière	-	L	-	
30 (déchets < 1 an)	-	L1-	-	chute de produits à durée de vie < 1 an (feuilles, rameaux...)
31 (déchets > 1 an)	-	L1+	-	chute de produits à durée de vie > 1 an (branches)
32 Consommation par herbivores	-	C	-	$pBnl = (L1-) + C + \Delta Bnl ; pBl = (L1+) + M + \Delta Bl$
33 Mortalité	-	M	-	(maladies, catastrophes et mortalité naturelle)
34 Décomposition	-	D	-	Conso. par décomposeurs de la biom. morte $D = L + M + (1-e)C - \Delta SEs$
Variables agronomiques (m³, m³/an)				
35 Stock sur pied				
36 bois matériau	Bla7+	-	ΔBla7+	
37 tronc	Btr	-	ΔBtr	
38 bois énergie	Bla	-	ΔBla	
39 Densité (m ³ /ha)	-	-		
40 Incrément annuel de bois (m ³ /(ha.an))	-	-	ΔBla7+	
41 Récolte (eXportation de biomasse)	-	xB	-	
42 bois matériau	-	xBla7+	-	
43 tronc	-	xBtr	-	
44 bois énergie	-	xBla	-	
45 Stock de produits	P	pP	ΔP	

Sauf mention contraire, les stocks et flux de biomasse s'expriment en matière sèche (t, t/an) ou en carbone (tC, tC/an)

Les fonctions de Richards s'écrivent d'une manière générale sous la forme suivante, en fonction du temps exprimé en années, pour décrire l'évolution du stock de biomasse, $B(t)$, exprimé en tonnes de matière sèche ou en tonnes de carbone :

$$B(t) = B_m \cdot (1 - b \cdot \exp(-rt))^{-n} \quad (2.1)$$

où :

- B_m est la valeur asymptotique supérieure de la fonction de Richards, et correspond à une taille maximale théorique,
- b est le paramètre d'échelle, défini par la relation $b = (B_m^{-n} - B_0^{-n}) / B_m^{-n}$, et n'a pas de signification biologique, mais positionne la courbe par rapport à l'axe du temps (c'est en fait une constante d'intégration),
- n est le paramètre de forme, déterminant le point d'inflexion de la courbe de croissance (n est toujours différent de zéro et parfois, l'expression de la fonction de Richards utilise $n^* = 1/n$ à la place de n),
- r est la « constante de taux » et n'a pas de sens physique ou biologique en elle-même.

Le taux de croissance réel, qui n'apparaît pas explicitement dans la fonction de Richards, peut être déterminé par une combinaison de r et de n ([Causton, 1978], [Ebert, 1980]). Deux expressions différentes sont possibles :

- $r/(n+1)$, qui représente le taux relatif moyen pondéré sur toute la période de croissance,
- $B_m \cdot r / [2(n+2)]$ qui représente le taux de croissance absolu moyen.

Les quatre quantités intéressantes, i.e. ayant une signification biologique, dans la fonction de Richards sont donc : B_m , n , $r/(n+1)$ et $B_m \cdot r / [2(n+2)]$.

La modélisation proposée ne permet pas de faire varier explicitement les différents stocks de carbone – en particulier celui du bois sur pied – en fonction des facteurs limitant la croissance de l'arbre (eau, luminosité, température, nutriments minéraux, teneur atmosphérique en CO_2 ...).

Il conviendrait, pour en tenir compte, de quantifier leur influence sur les différents paramètres de la fonction de croissance (B_m , b , r , n), tels que présentés dans l'équation (2.1).

Les principaux facteurs limitant la croissance des arbres sont :

- | | |
|---|---|
| ▪ la disponibilité en lumière, | ▪ le vent, |
| ▪ la disponibilité en eau, | ▪ les autres plantes ou animaux, |
| ▪ la température, | ▪ les traitements de culture imposés par l'Homme. |
| ▪ les minéraux, | |
| ▪ les gaz atmosphériques (en particulier le CO_2), | |

Il est à noter que les rendements de production de biomasse actuels sont souvent inférieurs à 50% des rendements potentiels du fait de ces limitations environnementales [Kozłowski et al., 1991].

b) Modèle du mode d'exploitation

Le mode d'exploitation du peuplement est décrit par la période de révolution (ou période de récolte), notée T , et par les proportions de déchets de récolte (issus des branches, des souches et des racines, et du tronc) laissés sur place.

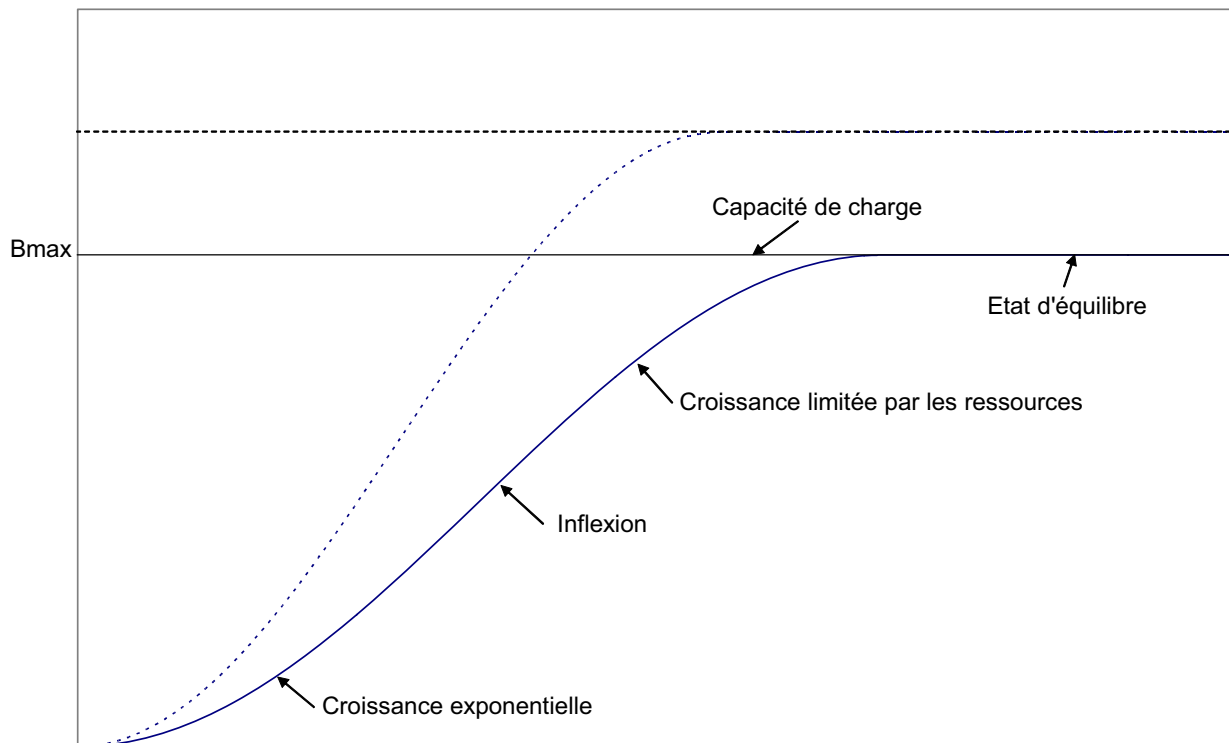


Figure 2. 5 - Profil de croissance de la biomasse forestière, d'après [Burger, 2002].

Les différentes phases de croissances sont précisées et la courbe en pointillés indique le potentiel d'augmentation de la productivité par l'augmentation de la capacité de charge du sol et par la réduction de la durée du régime transitoire pour atteindre la valeur maximale du stock de biomasse possible.

Trois cas limite peuvent être caractérisés :

- la récolte du bois de tronc seul (pas de déchets provenant du bois de tronc),
- la récolte du bois aérien (les déchets de récolte proviennent uniquement du bois des racines),
- la récolte de la totalité du bois (pas de déchets de récolte).

Plus la quantité de déchets est faible, plus l'intensité de récolte est importante. En réalité, la fraction de déchets issus du tronc n'est jamais nulle, puisqu'en général 10 à 20% des troncs sont laissés sur place après la récolte.

Par ailleurs, une hypothèse forte est faite dans ce modèle : le sol est supposé garder une qualité constante après chaque récolte, ce qui permet de décrire l'évolution du stock de carbone dans les arbres de façon identique à chaque rotation, ce qui constitue une simplification majeure. Le modèle suppose donc que le peuplement dispose de tous les nutriments nécessaires à sa croissance.

c) Modèle de l'évolution du stock de carbone dans la litière

Le stock de litière dépend de la quantité de déchets laissés sur place lors de la récolte. Deux types de litières peuvent être distingués : la litière issue des déchets d'origine ligneuse (tronc, branches, racines d'architecture) et la litière d'origine non ligneuse (feuilles, racines fines). Cette distinction est imposée par le terme source des déchets de récolte dans le compartiment constitué par la litière d'origine ligneuse : d'une part les vitesses de décomposition sont différentes et d'autre part, la récolte induit des déchets d'origine ligneuse, différents des déchets liés à la mortalité naturelle.

Litière non ligneuse : son stock est calculé à partir du taux de production de litière non ligneuse, noté $L_{1-}(t)$, correspondant à des déchets de durée de vie généralement inférieure à l'année.

$$L_{1-}(t) = 1 - \exp(-2,3 \cdot t/t_C) \quad (2.2)$$

Ce taux représente la production de litière comme une fraction de sa valeur au climax [Dewar, 1991]. t_C est le temps nécessaire pour atteindre un état de quasi-équilibre, correspondant à 90% de la production d'une forêt « âgée » c'est-à-dire proche du stade « climacique » (à noter que $\exp(-2,3) \approx 0,1$).

Les productions de litière issue des racines fines $L_{1-,f}(t)$ et issue du feuillage $L_{1-,l}(t)$ s'expriment comme suit :

$$L_{1-,f}(t) = \Lambda_f \cdot L_{1-}(t) \quad L_{1-,l}(t) = \Lambda_l \cdot L_{1-}(t) \quad (2.3)$$

Litière ligneuse : De la même façon, les productions de litière issue des trois compartiments « branches (b) », « tronc (tr) » et « racines d'architecture (s) » s'expriment comme une fraction de la production au stade climax. Si $B(t)/B_m$ est noté L_{1+} , les parts des différents compartiments de la litière ligneuse s'écrivent alors :

$$L_{1+,b}(t) = \Lambda_b \cdot L_{1+}(t) \quad L_{1+,tr}(t) = \Lambda_{tr} \cdot L_{1+}(t) \quad L_{1+,s}(t) = \Lambda_s \cdot L_{1+}(t) \quad (2.4)$$

Par ailleurs, à chaque récolte, une partie des déchets est laissée sur place et vient augmenter le stock de litière ligneuse. À la fin de chaque révolution, le stock de chacune des trois composantes ($j = b, tr, s$) devient :

$$C_j \rightarrow C_j + h_j \cdot B(T) \quad (2.5)$$

Chacun des stocks est donc solution d'une équation différentielle du premier ordre :

$$dC_i(t)/dt = L_i(t) - k_i \cdot C_i(t) \quad (2.6)$$

Avec $i = 1-f, 1-l, 1+b, 1+tr, 1+s$.

Tableau 2. 3 - Résultats des études de sensibilité sur un peuplement de pin pour les différents paramètres du modèle, d'après Dewar et Cannell, 1992. $B_m = 215$ tC/ha ; $b = 1$; $r = 0,5$; $n = 1$.

Paramètre (a)	Valeur nominale	Variation de (a)	Stock de carbone à l'équilibre (tC/ha)					Variation de (b)
			Biomasse	Produits	Litière	Sol	Total (b)	
			74	34	24	83	215	
g_f	6,3 tC/ha	± 20 %	72 ;75	34	24	83	213 ;216	-1 ;0
g_{fr}	2,7 tC/ha	± 20 %	73 ;75	34	24	83	214 ;215	0
t_c	14 ans	± 20 %	74	34	24	85 ;82	217 ;213	+1 ;-1
h_b	0,09	-50 ;+100 %	63 ;115	35 ;33	15 ;60	74 ;119	186 ;326	-13 ;+52
h_{wr}	0,19	-50 ;+100 %						
T_p	57	-50 ;+100 %	74	17 ;69	24	83	196 ;249	-9 ;+16
Λ_f	1,3 tC/(ha.an)	± 50 %	74	34	23 ;24	73 ;92	204 ;224	-5 ;+4
Λ_{fr}	2,7 tC/(ha.an)	-50 ;+100 %	74	34	23 ;25	63 ;123	194 ;257	-10 ;+19
k_f	3,0 ans ⁻¹	-50 ;+100 %						
k_w	0,06 ans ⁻¹	-50 ;+100 %						
k_{fr}	1,5 ans ⁻¹	-50 ;+100 %	74	34	48 ;12	166 ;42	322 ;161	+50 ;25
k_{mos}	0,03 ans ⁻¹	-50 ;+100 %						
β	0,5	± 20 %	74	34	24	67 ;100	198 ;231	-8 ;+7

Tableau 2. 4 - Matrices de conversion d'usage des sols : variations des stocks et flux. Pour les sols, les valeurs numériques sont issues de Arrouays et al., 2002.

	Culture	Prairie permanente	Forêt non exploitée	Forêt exploitée au max de l'AAM	Forêt exploitée au max de l'AAC	Forêt exploitée au max du stock
Variation du stock de C total (sol compris), en tC/ha						
Culture		-30,3	-128,1	-64,1	-50,1	-93,1
Prairie permanente	30,3		-97,8	-33,8	-19,8	-62,8
Forêt non exploitée	128,1	97,8		64,0	78,0	35,0
Forêt exploitée au max de l'AAM	64,1	33,8	-64,0		14,0	-29,0
Forêt exploitée au max de l'AAC	50,1	19,8	-78,0	-14,0		-43,0
Forêt exploitée au max du stock	93,1	62,8	-35,0	29,0	43,0	
Variation du flux de stockage, en tC/(ha.an)						
Culture		-2,3	-1,8	-4,9	-4,4	-3,4
Prairie permanente	1,2		-0,3	-3,4	-2,9	-1,9
Forêt non exploitée	1,3	0,3		3,1	-2,6	-1,6
Forêt exploitée au max de l'AAM	4,4	3,4	3,1		0,5	1,5
Forêt exploitée au max de l'AAC	3,9	2,9	2,6	-0,5		1,0
Forêt exploitée au max du stock	2,9	1,9	1,6	-1,5	-1,0	

d) Modèle d'évolution du stock dans la matière organique du sol

Pour chaque composant de la litière, la décomposition est modélisée en deux étapes : de la litière vers la matière organique du sol et du sol vers l'atmosphère [Dewar, 1991].

Flux vers le sol : Un premier flux de carbone vers le compartiment « sol » provient des différents types de litière. Des constantes β_i , i valant 1-f, 1-l, 1+b, 1+tr, ou 1+s, définissent donc la fraction de litière du compartiment i qui est transmise à la matière organique du sol.

Flux vers l'atmosphère : Le carbone réémis vers l'atmosphère provient de la décomposition de la matière organique du sol. La dynamique du compartiment constitué par la matière organique du sol est décrite par l'équation suivante :

$$dSE_s(t)/dt = \sum_i \beta_i k_i C_i - k_{SE_s} SE_s \quad (2.7)$$

où k représente le taux de décomposition annuel de chaque compartiment du sol.

2.2.3. Facteurs limitants

Plusieurs types de facteurs limitants interviennent dans la croissance des écosystèmes forestiers :

- Les facteurs climatiques tels que l'ensoleillement, la température ou la disponibilité en eau,
- Les facteurs liés au sol,
- Les facteurs limitant de la photosynthèse brute, comme les nutriments minéraux ou les caractéristiques des espèces.

La Figure 2. 5 présente une courbe de croissance aux différents stades : il est possible d'identifier successivement plusieurs phases de croissance :

- la première correspond à une croissance exponentielle,
- la deuxième, après le point d'inflexion, correspond à une phase où la croissance est limitée par les ressources du fait de la compétition entre les individus,
- la troisième enfin, correspond à un état d'équilibre qui tend vers le stade climax.

Il est possible de déplacer ces différentes phases et de les faire tendre vers un état d'équilibre supérieur en s'affranchissant de certains facteurs limitants. Ainsi le travail du sol permet d'augmenter sa capacité de charge et donc le stock total. Il est possible également de déplacer la phase de croissance limitée par les ressources par des apports d'engrais ou de phytosanitaires. Enfin, par la sélection des individus les plus productifs, il est également possible d'obtenir des peuplements dont le stock est plus important.

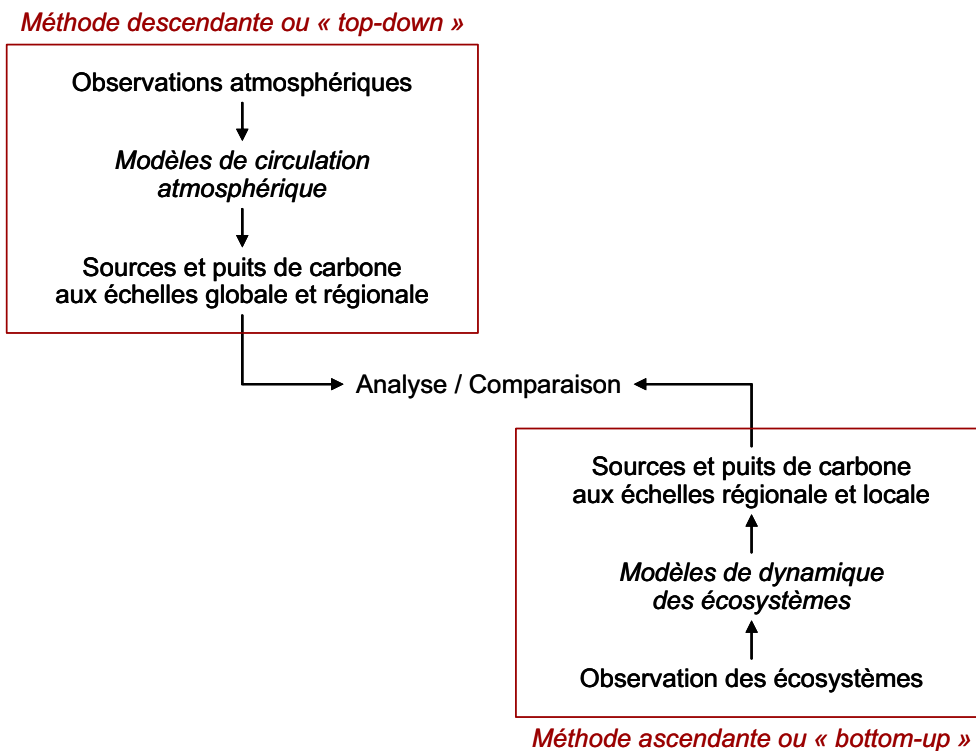


Figure 2. 6 - Typologie des méthodes d'évaluation des flux et stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers.

Tableau 2. 5 - Comparaison de différentes estimations du flux de stockage de C annuel piégé naturellement par les écosystèmes forestiers. Chaque résultat provient d'une méthode de calcul différente.

Méthode		Référence	Période de référence	Flux terrestre annuel Gt C/an
Descendante	O ₂ et CO ₂	Plattner <i>et al.</i> , 2002	Années 1990	-0,7 ± 0,8
	Modèle inverse	Gurney <i>et al.</i> , 2002	1992-1996	-1,4 ± 0,8
Ascendante	Inventaires forestiers	Goodale <i>et al.</i> , 2002	Années 1990	-0,65 ± 0,05
	Changement d'usage des sols	Houghton, 2003	Années 1990	+2,2 ± 0,8

2.2.4. Études de sensibilité

L'évolution du stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers dépend bien sûr de nombreux paramètres, identifiés dans les différentes équations présentées précédemment : le type de biome (espèce), qui influe la courbe de croissance elle-même, mais aussi le mode de gestion, c'est-à-dire la combinaison d'une période de rotation, d'une quantité de déchets laissés en place et d'une répartition des utilisations du bois exporté.

Les études de sensibilité proposées ici proviennent des travaux de Dewar et Cannell [Dewar et Cannell, 1992], et ont été réalisées sur une plantation de pins, caractérisée par un espacement initial entre les arbres de 2 m, une période de rotation de 57 ans et une classe de croissance de $14 \text{ m}^3/(\text{ha.an})$ (Tableau 2. 3).

Les paramètres sont connus avec plus ou moins de précision et certains méritent une attention plus particulière [Dewar et Cannell, 1992]. Certaines valeurs, notamment celles de l'évolution du stock de biomasse (courbe de croissance), celle de la densité du bois ou du contenu de la matière sèche en carbone peuvent être considérées comme relativement sûres. D'autres valeurs, notamment celles qui concernent le feuillage et les racines fines, ont une influence négligeable sur le bilan global de carbone, même si leur incertitude est grande, du fait qu'elles mobilisent des flux relativement faibles.

Les paramètres les plus incertains sont les fractions de biomasse répartie dans les branches, le tronc ou les racines d'architecture, qui varient au cours du temps, ainsi que les grandeurs caractérisant les dynamiques du sol (part des déchets et taux de décomposition).

2.3. ESTIMATION DU POTENTIEL DE STOCKAGE À L'ÉCHELLE GLOBALE

2.3.1. Incertitudes sur les stocks et flux actuels

Le bilan carbone du système « Surface Terrestre – Atmosphère » montre que les mesures de l'accroissement atmosphérique et des flux de stockage terrestre et océanique ne suffisent pas à expliquer la répartition de toutes les émissions (émissions dues à la combustion d'énergies fossiles et émissions liées aux changements d'utilisation des sols). Une hypothèse possible est donc que cette part complémentaire des émissions a été absorbée par les surfaces terrestres, par d'autres phénomènes que les seuls changements d'usage des sols. Des estimations des gains ou des pertes en carbone du fait du changement d'usage des sols sont proposées dans le Tableau 2. 4.

Les estimations des flux échangés entre l'atmosphère et les biomasses terrestres peuvent provenir de différentes méthodes, dont les incertitudes sont différentes, voire même éventuellement les résultats, parfois contradictoires (Tableau 2. 5). Deux grands types d'évaluation peuvent être distingués : les méthodes descendantes et les méthodes ascendantes (Figure 2. 6).

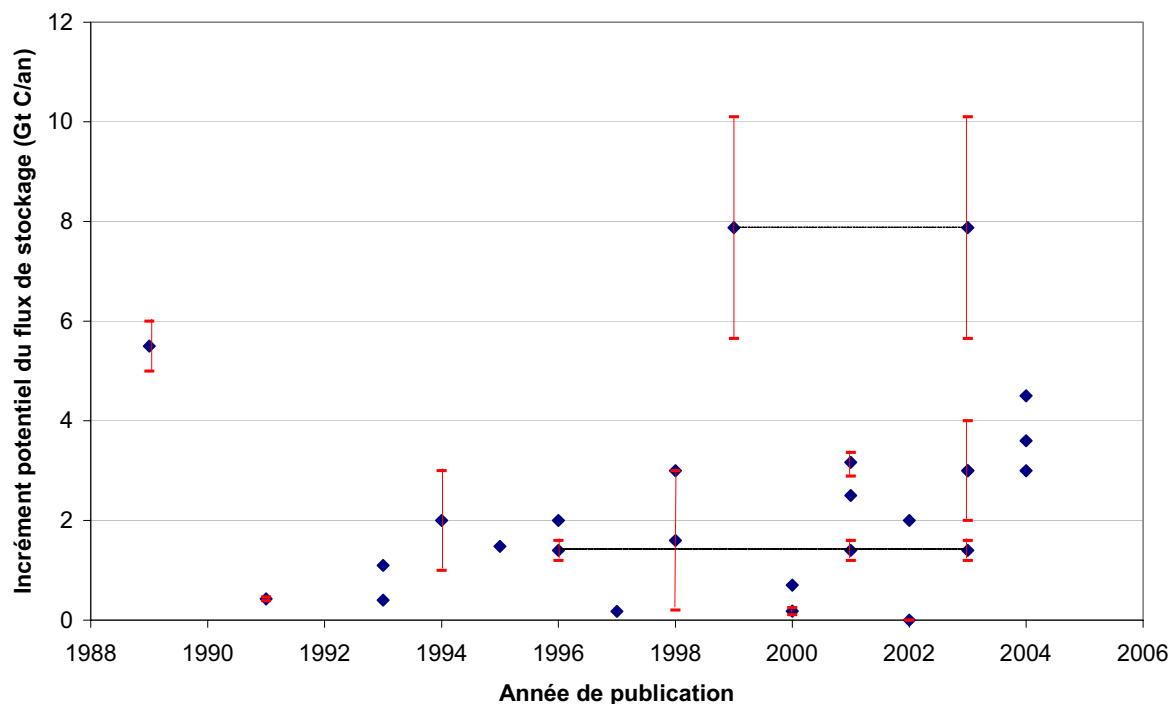


Figure 2. 7 - Estimations de l'incrément potentiel du flux de stockage de carbone mobilisable par les écosystèmes forestiers dans le monde. Lorsqu'elles étaient disponibles, les incertitudes ou les intervalles de variations des valeurs des flux ont été précisées. Les pointillés indiquent les chiffres repris dans des publications ultérieures.

Tableau 2. 6 - Valeurs numériques des estimations de la Figure 2. 7.

Année	Référence	Incrément de flux (Gt C/an)	Année	Référence	Incrément de flux (Gt C/an)
1989	Jarvis	5,5 ± 0,5	2000	Sampson et al.	0,7
1991	Dixon et al.	0,43 ± 0,14		Sohngen et Sedjo	0,18 ± 0,07
1993	Dixon et al.	1,1	2001	Bonnet	2,5
	Melillo et al.	0,40		Missfeldt et Haites	3,17 ± 0,28
1994	Dixon et al.	2 ± 1		Puhe et Ulrich	1,4 ± 0,2
1995	Nilsson et Schophauser	1,48	2002	Faloon et al.	4,4 · 10 ⁻⁴ ± 1,55 · 10 ⁻⁴
1996	Cole et al.	2		Mahli et al.	2
	IPCC	1,4 ± 0,2	2003	Albrecht et Kandji	7,88 ± 2,23
1997	Winjum et Schroeder	0,18		Cannell	3 ± 1
1998	Lal et al.	3		Palumbo et al.	3
	Warring et Running	1,6 ± 1,4		Zhang et Xu	1,4 ± 0,2
1999	DOE	7,88 ± 2,23	2004	Baral et Guha	3,6
				Smith	4,5
				Palumbo et al.	3

Les méthodes descendantes donnent une évaluation globale des flux, qui est généralement peu sensible au mode de calcul ou au modèle utilisé, et dont les incertitudes sont bien maîtrisées. L'intérêt de ce type de calcul est que tous les phénomènes ayant une influence sur les échanges de carbone dans le système STA sont pris en compte, même si ces phénomènes sont mal connus, voire inconnus. En revanche, les mécanismes impliqués dans ces échanges peuvent être mal ou pas du tout décrits, ce qui ôte toute valeur prédictive à la démarche, qui n'a donc qu'un rôle de description d'un état sur une période donnée. Enfin, les évaluations par les méthodes descendantes sont très dépendantes du nombre de sites de mesures, aujourd'hui encore trop peu nombreux pour avoir une résolution spatiale précise [Houghton, 2003].

À l'inverse, les méthodes ascendantes, basées sur des inventaires, présentent une bonne résolution et ont une forte valeur prédictive de la contribution des écosystèmes forestiers dans le cycle du carbone, dans la mesure où les flux sont déterminés sur la base des mécanismes physiques et biologiques impliqués. Les faiblesses de ce type de méthodes concernent la représentativité des sites retenus pour les mesures, la non prise en compte de tous les écosystèmes terrestres dans le cas des inventaires forestiers et les incertitudes relativement grandes sur les données.

Finalement, ces deux modes de calcul sont relativement complémentaires et doivent être confrontés pour assurer une bonne estimation des flux échangés entre les différents compartiments du système STA.

2.3.2. Paramètres pertinents pour l'évaluation à l'échelle globale

La comparaison des différentes méthodes d'évaluation des flux échangés entre l'atmosphère et les autres compartiments met en évidence les paramètres qui doivent être connus pour pouvoir interpréter correctement les résultats numériques. Tout d'abord, il importe de connaître la période de référence sur laquelle est faite l'évaluation : cette période fixe les émissions anthropiques de CO₂ ainsi que les situations de référence pour l'usage des sols. La méthode d'évaluation (descendante ou ascendante, paramètres pris en compte, ...) doit bien sûr elle aussi être connue, car elle donne l'échelle de pertinence du résultat, ainsi que les sources et l'ampleur des incertitudes.

Enfin, le résultat est très dépendant des phénomènes qui sont pris en compte ou non dans le calcul : il convient de vérifier si tous les phénomènes sont comptabilisés ou si seulement les phénomènes anthropiques sont pris en compte, et également de savoir si les transports inter-compartiments sont évalués, dans la mesure où ils n'apparaissent pas systématiquement dans les bilans à l'échelle globale.

L'évaluation du potentiel de stockage supplémentaire par les écosystèmes terrestres, et en particulier les forêts, dépend également d'un certain nombre de paramètres. Le premier d'entre eux, le plus déterminant, est la surface disponible pour la plantation de nouvelles terres boisées. Cette donnée dépend elle-même de l'évolution de plusieurs variables, difficiles à prévoir à moyen et long terme (évolution de la population mondiale, compétition pour l'allocation des sols, ...). L'estimation du potentiel de stockage supplémentaire dans les forêts ne pourra donc se baser que sur des scénarios, ce qui induit une relative incertitude. Les estimations des surfaces à différents horizons temporels sont nombreuses, mais très dispersées. Les hypothèses sur lesquelles elles reposent varient en effet beaucoup d'une étude à une autre, notamment en ce qui concerne les surfaces indispensables à l'alimentation humaine.

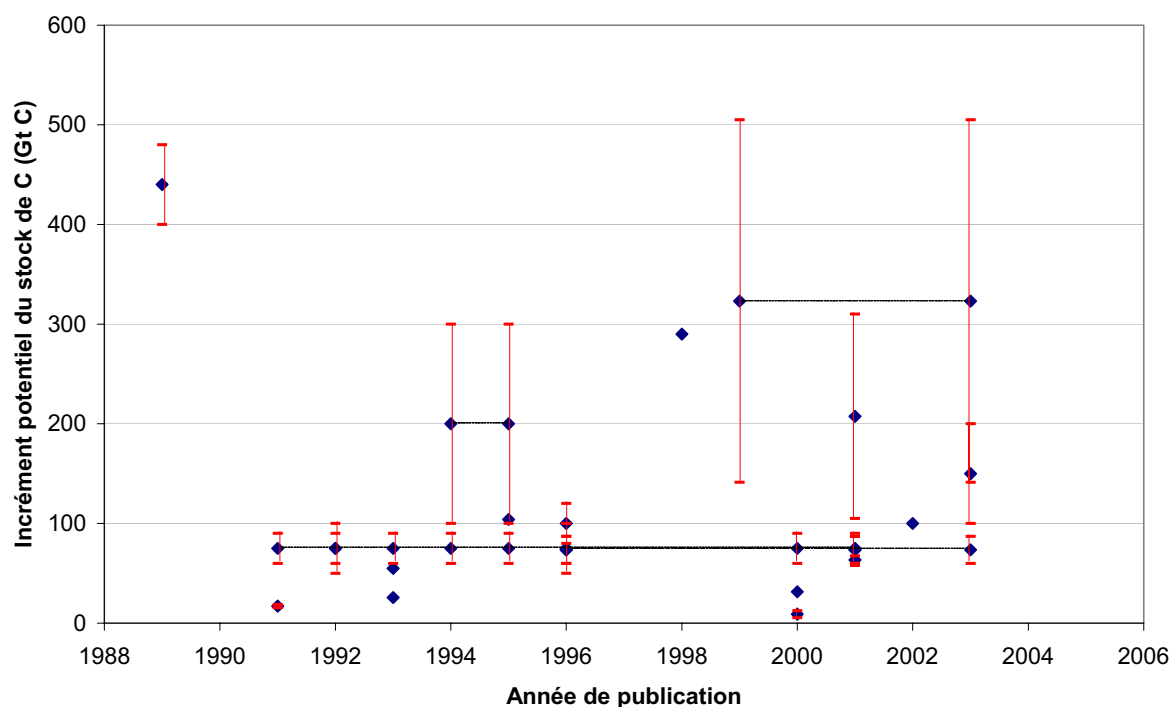


Figure 2.8 - Estimations de l'incrément potentiel de stock de carbone mobilisable par les écosystèmes forestiers. Lorsqu'elles étaient disponibles, les incertitudes ou les intervalles de variations des valeurs des flux ont été précisées. Les pointillés indiquent les chiffres repris dans des publications ultérieures.

Tableau 2.7 - Valeurs numériques des estimations de la Figure 2.8.

Année	Référence	Incrément de stock (Gt C)	Année	Référence	Incrément de stock (Gt C)
1989	Jarvis	440 ± 40	1996	Rierner	75 ± 25
1991	a, Dixon et al.	17 ± 1,5	1998	IGPB	290
	b, Dixon et al.	75 ± 15	1999	DOE	323 ± 182
1992	a, Winjum et al.	75 ± 25	2000	De Jong et al.	75 ± 15
	b, Winjum et al.	75 ± 15		Sampson et al.	31,5
1993	a, Dixon et al.	75 ± 15		Sohngen et Sedjo	9 ± 3,5
	b, Dixon et al.	55	2001	De Long	75 ± 15
1994	Dixon et al.	200 ± 100		Grimston et al.	207,5 ± 102,5
	Trexler et Haugen	75 ± 15		Kauppi et al.	73,5 ± 13,5
1995	Brown et al.	75 ± 15		Missfeldt et Haites	62,5 ± 4,8
	Nilsson et Schophauser	104		Puhe et Ulrich	73,5 ± 13,5
	Schimel	200 ± 100	2002	Mahli et al.	100
1996	Brown et al.	73,5 ± 13,5	2003	Albrecht et Kandji	323 ± 182
	Cole et al.	100 ± 20		Cannell	150 ± 50
	IPCC	73,5 ± 13,5		Zhang et Xu	73,5 ± 13,5

Le deuxième paramètre déterminant pour l'estimation du stockage supplémentaire dans les écosystèmes forestiers est la productivité des écosystèmes. De même que pour les surfaces disponibles, l'évaluation des taux de croissance des forêts dans les années à venir dépend de plusieurs facteurs, dont les conditions climatiques, qui peuvent être relativement incertains.

Deux types de terrains principalement peuvent être pris en compte pour le boisement :

- Les terres qui sont abandonnées par l'agriculture, soit du fait de la satisfaction de la demande agricole, soit parce qu'elles ont subi une modification de fertilité, liée à la qualité du sol ou au climat,
- Les prairies ou surfaces herbacées non occupées par l'agriculture, du fait soit encore une fois de leur manque de fertilité, soit de leur difficulté d'accès ou d'exploitation.

2.3.3. Première évaluation du potentiel à l'échelle globale

La littérature montre de nombreuses évaluations des surfaces potentiellement disponibles pour le boisement et des rendements correspondants : la Figure 2. 9 fait le bilan de différentes évaluations. La variabilité des estimations est relativement grande, de 1 à presque 30 pour les surfaces et de 1 à 20 pour les rendements, tous horizons temporels confondus. Les estimations des incréments de stocks (Tableau 2. 6) et de flux (Tableau 2. 7) sont d'ailleurs très variables.

La principale source de différences entre ces évaluations réside dans les scénarios pour l'alimentation humaine qui ont été utilisés : la répartition entre terres agricoles, pâturages et forêts peut être en effet très variable d'un scénario à un autre. De même, des différences peuvent être liées à diverses interprétations d'un même paramètre : une augmentation de production de cultures alimentaires à l'échelle globale peut être attribuée soit à une augmentation des surfaces cultivées, soit à une augmentation des rendements à l'hectare, ce qui fait varier significativement les surfaces disponibles pour de nouveaux boisements. Enfin, le devenir des pâturages est aussi relativement incertain et source de variations entre les estimations : selon les scénarios, l'alimentation humaine sera plus ou moins riche en produits carnés, d'où la nécessité de plus ou moins de surface pour les animaux, cette surface dépendant également du type d'élevage (intensif ou extensif).

En se basant sur certaines hypothèses conservatoires, il est possible d'évaluer un potentiel réaliste, ou minimal, de stockage supplémentaire de carbone dans les écosystèmes forestiers :

- tout d'abord, en ne considérant que l'augmentation liée à la demande croissante en bois [Sohngen et Sedjo, 2000], un flux de 0,11 à 0,25 Gt C/an pourrait être stocké entre 1995 et 2045,
- ensuite, en ce qui concerne les activités de boisement, certains pays ont déjà entrepris d'importants projets de plantation. L'IPCC estime que la contribution de ces projets d'afforestation, ajoutés à d'autres activités comme l'agroforesterie pourrait s'élever à une valeur comprise entre 1,2 et 1,6 Gt C/an entre 2008 et 2012.

Cette évaluation basse porte le flux potentiel de stockage de carbone supplémentaire dans les écosystèmes forestiers à une valeur comprise entre 1,31 et 1,85 Gt C/an jusqu'à 2045. Cette valeur est significative par rapport à l'accroissement annuel actuel du taux atmosphérique, s'élevant à environ 2 Gt C/an, même compte tenu des incertitudes.

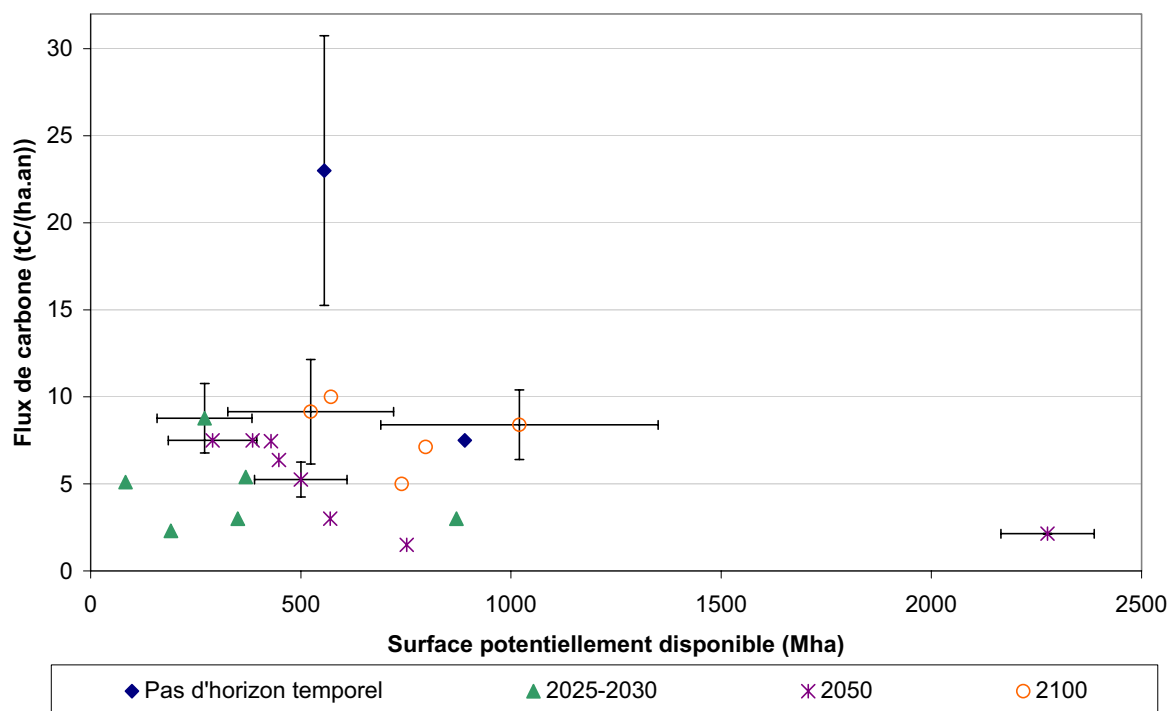


Figure 2. 9 - Estimations des flux de carbone potentiellement stockés dans les écosystèmes forestiers et des surfaces supplémentaires à boiser qui leur correspondent, pour différents horizons temporels.

Lorsqu'elles étaient disponibles, les incertitudes ou les domaines de variations des différentes valeurs ont été indiquées. D'après les données de [Battjes, 1994], [Edmonds *et al.*, 1996], [Fischer et Schratzenholzer, 2001], [Hall *et al.*, 1993], [Johansson *et al.*, 1993] [Lashof et Tirpak, 1990], [Lazarus *et al.*, 1993], [Leemans, *et al.*, 1996], [Nakicenovic *et al.*, 1998], [Sorensen, 1999], [Swisher et Wilson, 1993], et [Williams, 1995].

2.4. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION

Comme il a été montré, les forêts constituent le stock de carbone le plus important de la surface terrestre superficielle, avec environ 1150 Gt C, à la fois dans la biomasse et dans la matière organique du sol [FAO, 2000]. De ce fait, les échanges de carbone entre les forêts et l'atmosphère sont importants : selon les estimations, entre 0,5 et 2 Gt C sont stockées chaque année dans les forêts. Dans les 15 dernières années, un certain nombre d'auteurs se sont intéressés aux potentiels de stockage supplémentaires, à la fois en terme d'incrément de flux et d'incrément de stock. Ainsi, entre 1,3 et 1,8 Gt C/an pourraient être stockées jusqu'en 2045, ce qui constitue une valeur significative relativement à l'accroissement annuel dans l'atmosphère, calé à environ 2 Gt C/an.

Les échelles de description des écosystèmes forestiers et de leur dynamique varient de l'échelle de l'individu à celle du peuplement. Pour les décrire, il est commode d'utiliser des courbes du type des courbes de Richards, qui peuvent modéliser la croissance d'un arbre isolé ou d'un peuplement entier, qui sont du même type que celles de tout organisme vivant (courbes sigmoïdes). Ce type de modélisation simple constitue une approche pertinente pour cette étude, qui s'intéresse tout à la fois aux écosystèmes sur pied et aux produits transformés et utilisés. Compte tenu des nombreuses incertitudes, notamment sur les dynamiques des échanges de carbone entre les sols forestiers et l'atmosphère, la modélisation de la croissance des stocks de carbone sous forme d'une cinétique de stockage présente l'avantage d'être facilement utilisable et d'avoir un niveau de description cohérent avec celui du modèle utilisé dans les bilans d'énergie et de carbone dans les filières de transformation et d'utilisation du bois.

Les études déjà existantes sur le stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers portent pour la plupart sur le système vivant, ou bien alors consistent en des bilans sur les produits seuls. Ce sont généralement des études qui relèvent soit du champ disciplinaire de la foresterie, soit de l'économie. Il est donc intéressant d'apporter un point de vue transversal complet, depuis l'établissement du peuplement jusqu'à la fin de vie des éventuels produits du bois. C'est cette démarche, guidée par le point de vue de l'énergéticien, qui fait l'objet de la présente étude et dont la mise en place est décrite dans le chapitre 3 du présent document.



Le chêne (*Quercus pedunculata* – *Q. sessiliflora*) couvre en France une surface de 3,2 Mha.

3. LA MAÎTRISE DES RESSOURCES FORESTIÈRES :

FONCTIONS MULTIPLES, DÉMARCHES QUANTITATIVES

Représentant plus du tiers des terres émergées, et près de 80 % des biomasses terrestres [FAO, 2003], les systèmes forestiers jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement du système « Surface Terrestre – Atmosphère ». L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel de contribution des écosystèmes forestiers à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre. Cette contribution peut prendre différentes formes dont les deux principales sont le stockage de carbone proprement dit, à la fois dans l'écosystème sur pied et dans les produits, et la substitution du bois qui permet de limiter, voire de diminuer les émissions de dioxyde de carbone, ce dans la mesure où elle permet l'économie de ressources fossiles.

Mais contrairement aux méthodes de stockage géologique du carbone en sous-sol ou dans les couches profondes des océans, dans le cas du stockage biologique, le dispositif mis en place n'a pas pour seule fonction celle de stocker du carbone. Dans le cas des forêts, il y a lieu de tenir compte d'un grand nombre de fonctions différentes. Il ne s'agit donc pas d'étudier l'un ou l'autre aspect du rôle des ressources forestières sans avoir à l'esprit la palette de toutes les fonctions possibles. Quelles sont les principales fonctions identifiables ? De quoi dépend la mise en œuvre de ces fonctions et quels sont les liens ou les contradictions entre les diverses utilisations possibles des forêts ? Quelles approches quantitatives peuvent être utilisées pour l'estimation des ressources ? Tels sont les points qui sont développés dans ce chapitre.

3.1 Des fonctions multiples

3.1.1 Fonctions de productions

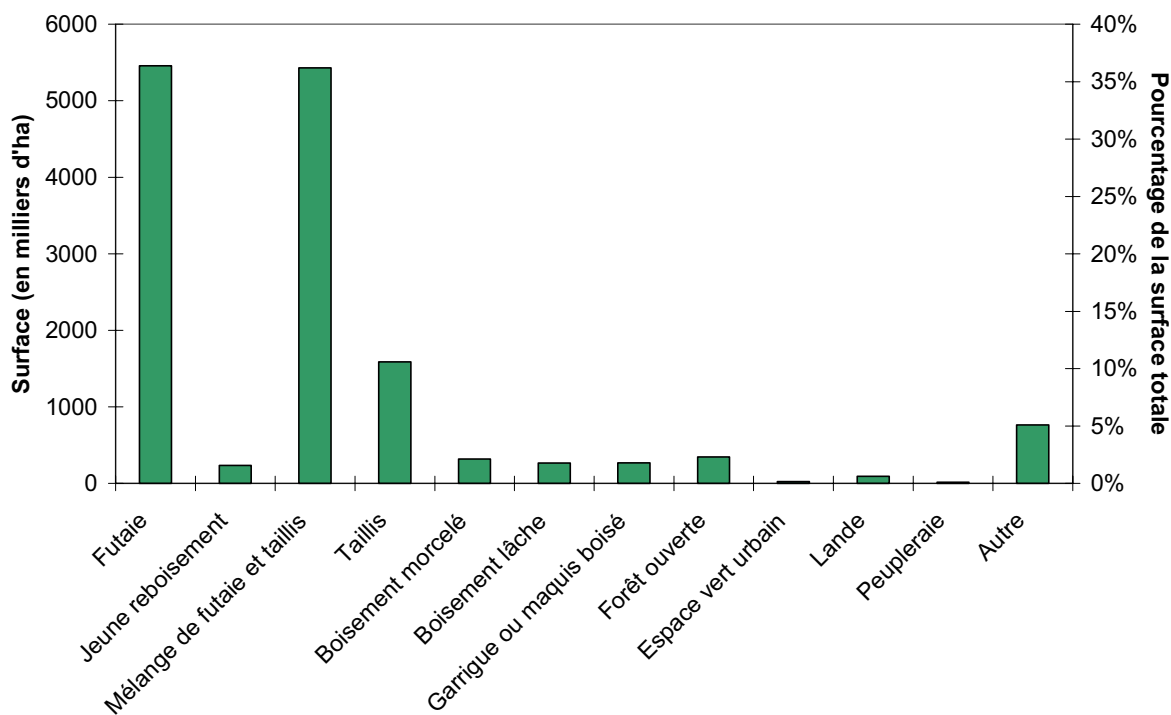
Du point de vue des usages anthropiques, les premières fonctions des forêts sont essentiellement des fonctions de production, qu'il s'agisse d'une production de matière première, de production d'énergie ou d'une production alimentaire, comme c'est le cas pour les systèmes agroforestiers. La répartition entre ces diverses fonctions est rappelée pour la France en Encadré 3. 1. En 2002, près de 3,4 Gm³ de bois rond ont ainsi été récoltés, dont presque 1,8 Gm³ étaient destinés au bois de feu, ce qui représente entre 0,4 et 0,5 Gtep, soit une source d'énergie primaire du même ordre de grandeur que celle correspondant à l'énergie nucléaire ou à l'énergie hydraulique, qui elles se présentent toutefois sous la forme la plus noble d'énergie finale, l'électricité.

Les systèmes forestiers de production peuvent être répartis en six catégories [Andersson et al., 2002], selon leur capacité à fournir plutôt du bois d'œuvre, d'industrie, du bois énergie ou des productions alimentaires :

- les forêts naturelles, matures ou non, à forte valeur économique en bois d'œuvre et à faible potentiel en bois énergie, si ce n'est sous la forme de déchets de récolte,
- les forêts régénérées naturellement, denses, matures ou non, à faible potentiel en bois d'œuvre, souvent du fait d'importants écrémages passés, et à fort potentiel pour la production de bois énergie. Cette catégorie peut inclure certains taillis naturels,

Encadré 3. 1 - Répartition des surfaces de forêt en France selon leurs utilisations

La grande majorité des surfaces de forêt françaises est utilisée pour la production de bois. Il reste d'ailleurs très peu de surfaces de forêt encore non perturbées par l'action humaine en France (Figure 3. 1), et dans l'Union Européenne plus généralement. Cependant, certaines surfaces sont soumises à des régimes particuliers de gestion, et contribuent ainsi à des fonctions de conservation des écosystèmes : la France compte actuellement environ 39000 ha de forêts de protection et 22000 ha de parcs naturels.



**Figure 3. 1 - Surface boisée totale en France par type national de formation végétale (données IFN, 2004).
La surface totale de forêt en France couvre 14,8 Mha, soit 27 % du territoire national.**

- les plantations destinées à la production de bois d'œuvre ou de fibres, où la production de bois énergie est souvent secondaire,
- les nouvelles plantations établies spécifiquement pour la production de bois énergie, comme les taillis à courte rotation,
- les systèmes agroforestiers, qui peuvent s'accompagner de la production de bois énergie, comme c'est souvent le cas dans les pays en développement,
- les autres systèmes forestiers, comme les forêts urbaines par exemple, n'ayant pas pour vocation initiale une fonction de production, mais qui peuvent être source de bois énergie comme objectif secondaire, sous forme de déchets d'entretien par exemple.

Bien sûr, il ne saurait être question de limiter les systèmes forestiers aux seuls rôles d'entités pourvoyeuses de combustibles et de matériaux. Au-delà de cette première catégorie de fonctions, il convient de souligner bien d'autres perspectives (Figure 3. 2) :

- préservation du milieu naturel : sols (frange littorale...), microclimats, protection contre le vent,
- aménagement pour des fonctions sociétales : paysage, usages récréatifs et cynégétiques,
- services environnementaux, collectifs ou industriels : traitement des eaux, remédiation,
- et, encore dans le cadre de fonctions environnementales globales, stockage de carbone ou préservation de la biodiversité, qui joue d'ailleurs un rôle important sur la productivité des écosystèmes [Baskin, 1994], et donc dans d'autres fonctions citées précédemment.

Ces rôles supplémentaires des forêts peuvent être regroupés en fonction de leur échelle d'influence, locale, régionale ou globale. C'est cette classification qui a été retenue pour les décrire dans les paragraphes suivants.

3.1.2 Préservation du milieu naturel

Les forêts présentent un intérêt particulier pour la préservation du milieu naturel, par l'intermédiaire de fonctions telles que la protection des sols contre l'érosion, la remédiation, la protection ou la maîtrise des microclimats, ou par leur rôle dans le cycle de l'eau et en particulier la protection des réserves d'eau douce, qui est aujourd'hui largement reconnu et étudié [FAO, 2004]. C'est le cas notamment des forêts de montagne, situées sur des zones où les précipitations sont fortes.

Les forêts situées sur les franges littorales, mangroves ou forêts de plages, jouent dans ce contexte un rôle particulier : elles permettent à la fois de maintenir une certaine structure au sol, et ainsi le protègent contre l'érosion, mais assurent également le maintien d'un microclimat et, en particulier dans le cas des mangroves, une certaine biodiversité.

3.1.3 Aménagement pour des fonctions sociétales

Les services rendus par les écosystèmes forestiers sont parfois plus difficilement quantifiables. C'est le cas lorsqu'il s'agit de fonctions sociétales comme les usages cynégétiques, la constitution d'un habitat pour la faune, les usages récréatifs, ou encore la contribution à la constitution du paysage.

C'est le cas également dans certains pays lorsqu'il s'agit de réhabiliter des sites industriels ou de décharge par l'établissement de nouvelles forêts ou parcs arborés.

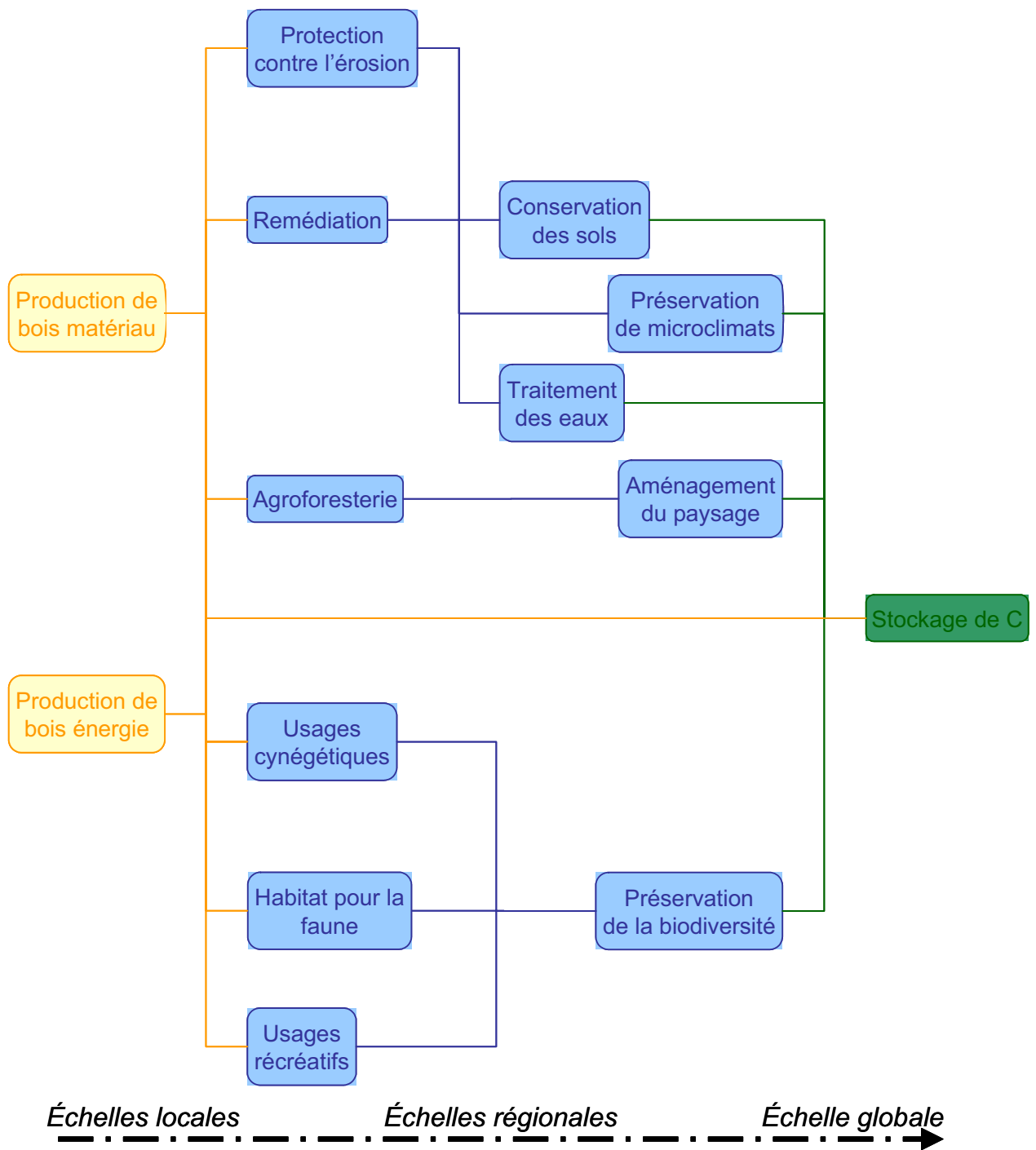


Figure 3. 2 - Les diverses fonctions des forêts, leurs liens et leur répartition en fonction de l'échelles des besoins remplis par ces fonctions.

3.1.4 Services environnementaux collectifs ou industriels

Enfin, le dernier type de fonctions qui peuvent être attribuées aux forêts est celui qui regroupe leurs fonctions environnementales, qu'elles soient collectives ou industrielles. Certains usages sont directement intéressants pour des activités industrielles, à une échelle locale ou régionale : c'est le cas pour le traitement des eaux ou la remédiation des sols. Les écosystèmes forestiers ont par ailleurs un rôle important pour des fonctions environnementales d'ampleur globale, notamment pour la préservation de la biodiversité, qui peut toutefois être selon les points de vue considérée comme d'ampleur locale, régionale ou globale [Khalifa, 1999], et la lutte contre l'intensification de l'effet de serre.

Ces services peuvent être considérés généralement comme concernant la collectivité ou bien, dans certains cas, une structure industrielle. C'est le cas lorsque des projets de stockage biologique de carbone sont mis en place par des industriels dans l'objectif de participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

3.1.5 Quels liens entre ces fonctions, quelles dimensions principales ?

L'énoncé exhaustif des diverses fonctions identifiées des écosystèmes forestiers montre bien que tous ces usages sont liés. La conservation de forêts existantes ou l'établissement de nouvelles forêts pour satisfaire aux diverses fonctions décrites précédemment peut remplir plusieurs objectifs conjointement ou au contraire satisfaire un objectif au détriment d'un autre.

L'action de l'Homme sur les écosystèmes forestiers peut donc avoir une influence sur plusieurs fonctions à la fois, soit en permettant aux forêts de remplir plusieurs objectifs conjointement, soit en amplifiant une fonction au détriment d'une autre.

Dans le cas de la problématique de lutte contre l'intensification de l'effet de serre et du rôle potentiel des forêts, la fonction principale est bien sûr celle du stockage de carbone. Mais cette fonction est fortement couplée à deux fonctions de production : la production de bois matériau et la production de bois énergie. D'une manière générale d'ailleurs, il convient de bien noter que toute action de reboisement, quel que soit son objectif initial, participe directement à cette fonction de stockage de carbone.

Les liens entre les diverses fonctions des forêts sont donc nombreux. Dans l'objectif d'identifier les potentiels des écosystèmes forestiers pour leur contribution à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre, il est intéressant de retenir trois directions principales parmi les fonctions détaillées précédemment :

- le stockage de carbone par échanges avec l'atmosphère,
- la production de matériaux issus de la biomasse et leurs usages variés,
- les usages énergétiques de la biomasse forestière.

Les trois aspects évoqués, parfois considérés comme relativement contradictoires et souvent abordés séparément, sont présentés conjointement dans cette étude.

La gestion des biomasses pour ces trois fonctions principales, tant sur le plan de l'énergétique que sur celui de l'effet de serre, peut donc avoir des conséquences sur d'autres fonctions, qu'il convient de prendre en compte dans tout projet, que les conséquences soient positives ou négatives.

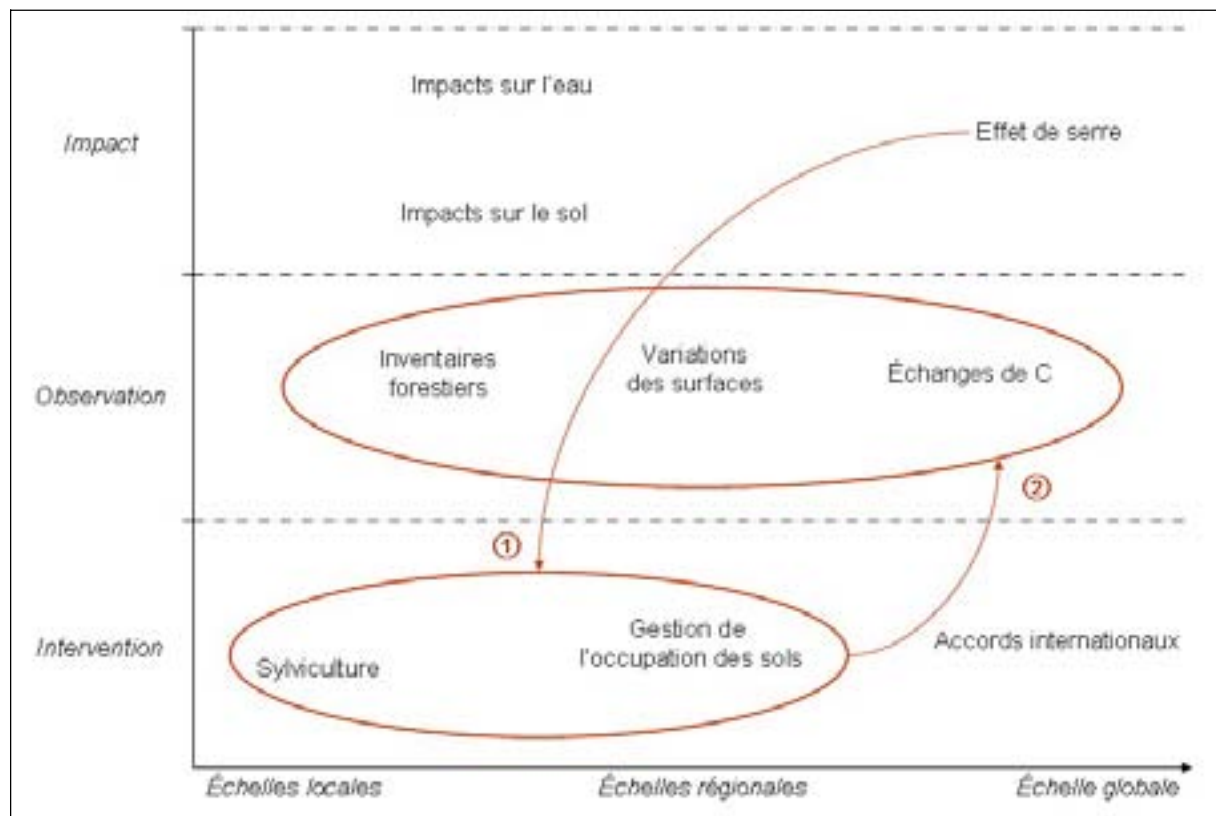


Figure 3.3 - Les différentes échelles d'espace impliquées dans un projet de stockage de carbone dans les forêts : de l'échelle de l'impact à celle de la mise en œuvre opérationnelle ①, et de la mise en œuvre opérationnelle à la mesure des effets induits du projet ②.

En ce qui concerne les réalisations, le nombre des dimensions possibles d'un projet et les caractéristiques de ces trois dimensions principales font que son élaboration n'a de sens que dans un contexte précis, prenant en compte toutes les contraintes ou données géographiques de proximité. Il y a lieu de remarquer enfin l'intérêt des ressources de biomasse, pour toute activité géographiquement très déconcentrée : énergie, matériaux, capture diffuse et stockage du carbone [Prieur et Rauch, 2003].

3.2 Un problème multi-échelles

L'utilisation des forêts par l'Homme présente donc différentes échelles de fonctionnalités. Chacune de ces fonctions intervient également à diverses échelles d'espace et de temps, à la fois dans sa mise en œuvre et dans ses impacts sur l'environnement. C'est encore une fois une distinction importante entre les modes de stockage biologique de carbone utilisant les écosystèmes forestiers et le stockage géologique, dont les effets induits sont relativement limités, dans l'espace et également dans le temps, hormis les éventuelles fuites de CO₂ hors du site de stockage. Ce sont les différentes échelles auxquelles interviennent les forêts, ainsi que les liens et les passages entre elles qui sont ici évoquées.

3.2.1 Description des échelles d'espace

La description des écosystèmes forestiers, de leurs évolutions, de leurs fonctions et de leurs impacts sur le système « surface terrestre – atmosphère » peut s'appuyer sur différents points de vue, chacun s'appliquant à une échelle géographique particulière. Il est ainsi possible de distinguer, sans qu'elles soient ni redondantes ni complètement disjointes, les échelles d'observation, les échelles d'impact des fonctions identifiées des forêts et les échelles d'intervention de l'Homme sur les écosystèmes forestiers.

L'observation globale des écosystèmes forestiers peut cacher de nombreuses hétérogénéités, tant sur le plan des formations végétales elles-mêmes que sur le plan de l'évolution des surfaces. Ainsi, les échelles d'observation peuvent s'étendre de l'échelle locale à l'échelle globale, suivant les caractéristiques observées. La description précédente des fonctions possibles des forêts montre que leurs échelles d'impacts s'étendent elles aussi des échelles locales à l'échelle globale (Figure 3. 2).

L'intervention de l'Homme sur les écosystèmes forestiers peut se traduire par différentes actions : intervention opérationnelle locale sur un peuplement, intervention régionale traduisant un plan d'aménagement d'une plus grande ampleur et, enfin, intervention globale, par exemple au travers de démarches de certification mondiale (Figure 3. 3). L'intensification de l'effet de serre est un problème quant à lui d'ampleur globale. Les actions à entreprendre, pour avoir un effet significatif, doivent s'organiser à l'échelle planétaire. Mais la mise en œuvre est nécessairement à l'échelle locale. Par ailleurs, il convient de prendre en compte dans tout projet les effets induits des actions menées qui s'étendent à des échelles au moins régionales (au sens d'échelle intermédiaire entre l'échelle locale et l'échelle globale), voire continentales. L'utilisation des biomasses forestières pour lutter contre l'intensification de l'effet de serre nécessite une mise en œuvre d'actions concrètes, opérationnelles, nécessairement à l'échelle locale.

Il y a lieu de distinguer les échelles d'intervention des échelles d'impacts. Les échelles d'intervention sont nécessairement des petites échelles, allant de l'action locale à éventuellement l'action régionale. En revanche, les effets attendus s'étendent sur toute la plage des échelles spatiales, des échelles locales à l'échelle globale. L'intensification de l'effet de serre illustre bien la manière dont la mondialisation d'un impact peut s'imposer à l'Homme (Figure 3. 3).

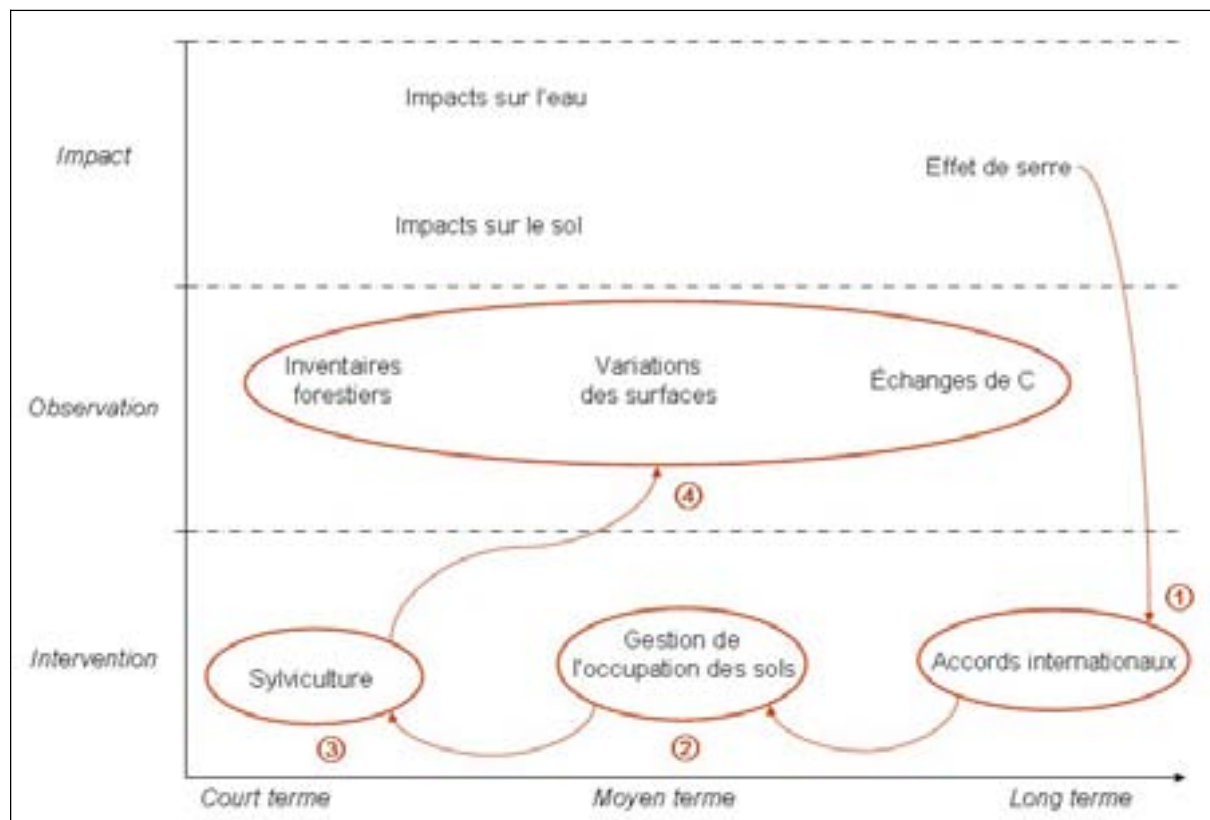


Figure 3. 4 - Les différentes échelles de temps impliquées dans un projet de stockage de carbone dans les forêts : de l'échelle de l'impact à celle de la mise en œuvre opérationnelle ①, ②, puis ③, et de la mise en œuvre opérationnelle à la mesure des effets induits du projet ④.

3.2.2 Description des échelles de temps

Le même type de classification peut être utilisé pour les échelles d'espace et les échelles de temps : échelle d'observation, échelle d'impacts des fonctions et échelles d'interventions. Ainsi, l'observation des surfaces de forêts et de leurs évolutions peut se faire sur des périodes courtes ou beaucoup plus longues, les impacts des différentes fonctions des forêts peuvent se manifester à divers horizons temporels et enfin les interventions de l'Homme sur les écosystèmes forestiers peuvent être ponctuelles dans certains cas et à long terme dans certains autres.

La dynamique des systèmes étudiés est différente de celle des effets attendus. De la même façon, aux diverses fonctions citées précédemment correspondent des échelles de temps différentes, soit vis-à-vis des causes soit vis-à-vis des effets de ces fonctions. Plusieurs échelles de temps vont se superposer : ainsi très souvent, il y a lieu de distinguer dans l'ordre croissant, l'échelle de la mise en place du projet, l'échelle des effets induits et l'échelle des conséquences sur l'intensification de l'effet de serre (Figure 3. 4).

De plus, une distinction peut être faite entre l'échelle d'observation et l'échelle réelle de l'impact lui-même. L'observation d'une fonction peut être ponctuelle dans le temps, tandis que les impacts d'un changement de pratique peuvent se traduire sur le long, voire le très long terme.

3.2.3 Quels liens entre les échelles ?

La grande variété des fonctions des forêts implique des liens étroits entre les différentes échelles évoquées précédemment. Les liens peuvent être caractérisés par un ensemble composé d'une fonction, de ses impacts et des modes d'intervention préconisés pour remplir ladite fonction : toutes les échelles peuvent alors être représentées.

Dans le cas étudié plus particulièrement ici, à savoir le stockage de carbone, l'observation à l'échelle globale des écosystèmes forestiers a montré leur potentiel de contribution à la limitation de l'intensification de l'effet de serre. Il s'agit là d'observation et d'impacts à une échelle spatiale globale, et à diverses échelles temporelles, situées entre des observations sur quelques années et des observations sur plusieurs décennies voire plusieurs siècles. La fonction identifiée est donc une fonction globale, dont les impacts dans le temps ne peuvent parfois être significatifs qu'à long terme. En revanche, les modes d'intervention sont nécessairement locaux, puisqu'il s'agit toujours d'augmenter la surface de forêt ou bien de changer les modes de sylviculture et d'utilisation des ressources.

Dans chacun des cas, différents critères de classification des échelles, qui ne se recoupent pas systématiquement, peuvent être définis. Les liens entre les échelles se retrouvent par la définition, pour un impact donné, de la nature de la source, de la caractérisation de la fonction considérée, de la nature de ses effets directs sur le système « surface terrestre – atmosphère », du mode d'intervention, et de ses effets induits.

Pour une même caractéristique (observation, fonction ou impact, ou intervention), le passage d'une échelle à une autre implique des modèles différents, c'est-à-dire des variables différentes, des précisions différentes et des relations différentes entre les variables. Il s'agit toujours de faire le lien entre les fonctions souhaitées, les modes d'intervention retenus et les impacts et effets induits à plus ou moins long terme et sur une zone plus ou moins étendue (Figure 3. 5).

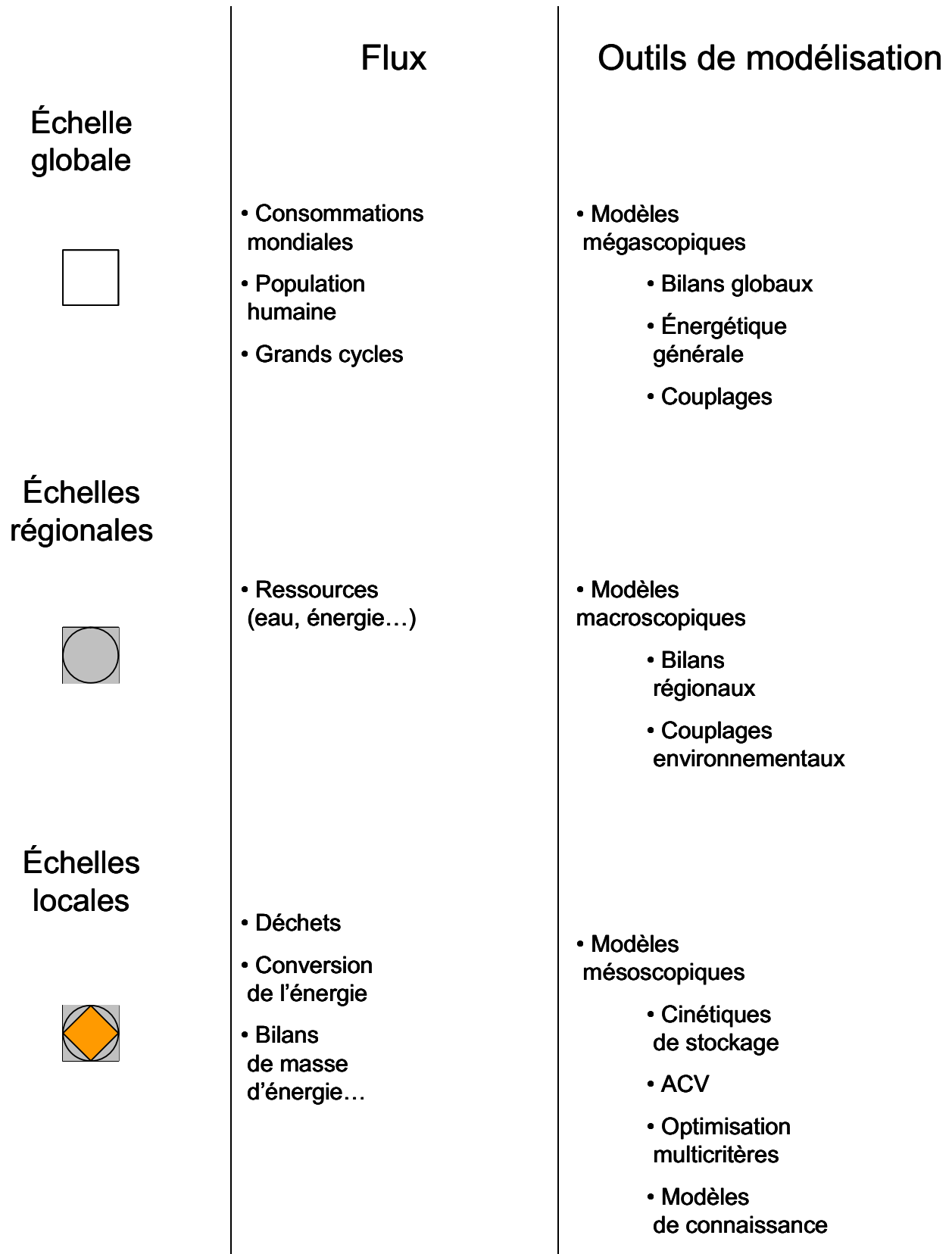


Figure 3. 5 - Liens entre les échelles d'espace et conséquences sur la modélisation.

Inspiré de [Nadeau et Puiggali, 1995].

3.3 Une démarche quantitative possible : l'Analyse du Cycle de Vie

L'estimation quantitative du potentiel de contribution des écosystèmes forestiers à la limitation de l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre nécessite l'utilisation d'une méthode systématique permettant de prendre en compte les différents aspects cités précédemment. Parmi les méthodes d'évaluation environnementales existantes, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) présente un certain nombre d'intérêts. C'est la description des possibilités offertes par cette méthode, ainsi que de ses limites et des adaptations possibles, qui fait l'objet du présent paragraphe.

3.3.1 Présentation générale de la méthode

Il s'agit ici de présenter l'ACV d'une manière générale. L'application au cas étudié précisément dans ce travail fait l'objet d'un paragraphe suivant.

a) Historique et structure de la méthode

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthodologie, dont les grands principes ont déjà été développés et utilisés depuis une trentaine d'années, et qui peut être mise en oeuvre pour évaluer les impacts environnementaux d'un système. Cette méthodologie a déjà été pratiquée sur de nombreux systèmes [Caseau, 2000], principalement sur des produits industriels, mais son usage s'étend actuellement à des systèmes larges, regroupant des activités plus vastes que la seule production.

À l'origine, c'est-à-dire dans les années 1970, suite au premier choc pétrolier, l'analyse du cycle de vie, ou tout du moins une méthode relevant des mêmes principes, a été mise en place, sous une forme moins aboutie que la forme actuelle, pour comparer les impacts environnementaux de différents produits industriels, et notamment pour estimer les coûts énergétiques liés à la fabrication des divers types de produits. Est désigné par le terme « système » l'ensemble des opérations se rapportant à un produit, à un procédé ou à une activité constituant l'objet de l'étude. L'analyse du cycle de vie est désormais une méthodologie normalisée et couramment utilisée [ISO 14040, ISO 14041, ISO 14043, et ISO 14049], aussi bien dans le milieu industriel pour des applications très précises que dans les domaines de la recherche et du développement.

Cette méthodologie repose principalement sur quatre grandes étapes (Figure 3. 6), abordées successivement, et relevant de divers champs disciplinaires [Rousseaux et Apostol, 2000] :

- la définition des objectifs et du champ de l'étude, qui consiste en une description exhaustive du système étudié, c'est-à-dire des différentes étapes de transformation ou d'utilisation et des sous-systèmes qui le constituent,
- l'inventaire des flux, qui relève plutôt d'une démarche de bilans de matière et d'énergie, sous toutes les formes possibles, des matières premières aux déchets, et des énergies primaires, renouvelables ou non, aux énergies finales,
- l'évaluation des impacts sur l'environnement, qui fait appel aux méthodes d'analyse multicritères, pour estimer l'importance relative des effets du système sur les différents impacts,
- l'interprétation et la recherche d'améliorations, qui est une phase de conception et d'aide à la décision, basée uniquement sur le critère de qualification environnementale du système.

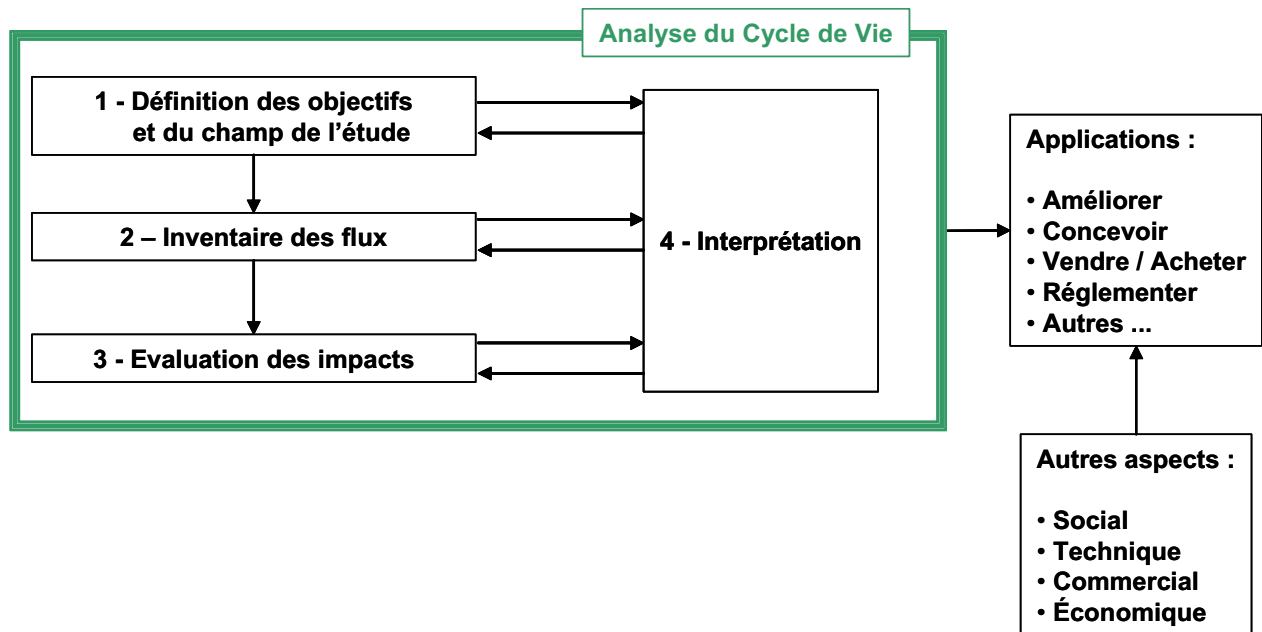


Figure 3. 6 - Les étapes et la structure d'une Analyse du Cycle de Vie. D'après [ISO 14040, 1997].

Encadré 3. 2 - L'unité fonctionnelle

Dans la phase de définition des objectifs et des frontières du système, qui constitue la première étape d'une analyse du cycle de vie, il y a lieu de définir « l'unité fonctionnelle », à laquelle tous les flux identifiés dans l'analyse du cycle de vie devront être rapportés. L'unité fonctionnelle sert de base de comparaison entre les systèmes étudiés, et est définie par rapports aux objectifs de l'étude et à la fonction du ou des systèmes étudiés. Elle doit tenir compte tout à la fois d'une unité de fonction, d'une unité de temps et d'une unité de produit [Rousseaux et Apostol, 2000].

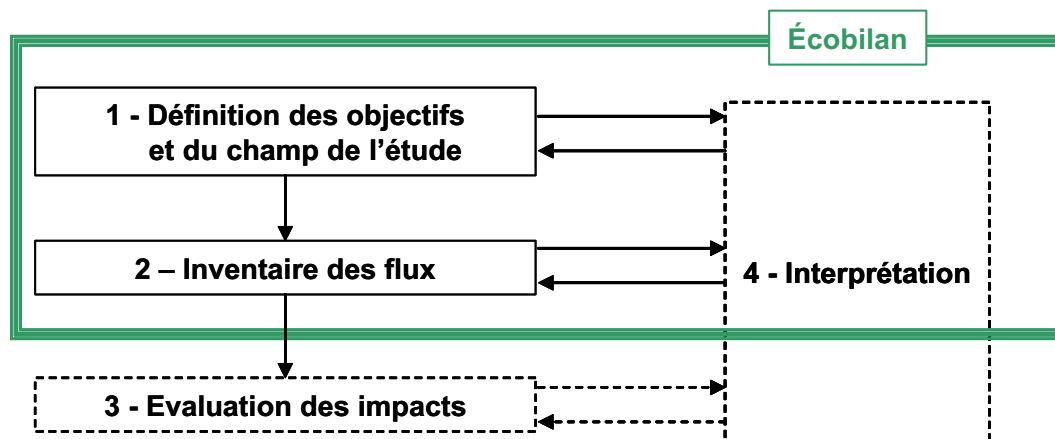


Figure 3. 7 - Les étapes d'un écobilan

L'analyse du cycle de vie apparaît donc comme un outil d'aide à la décision qui permet de recenser et de quantifier, tout au long du cycle de vie d'un système, les flux de matière et d'énergie associés, et de traduire ensuite ces flux sous forme d'impacts environnementaux.

b) Écobilan

À elles seules, les deux premières étapes d'une analyse du cycle de vie, soit définition des objectifs et champ de l'étude et inventaire des flux, constituent un écobilan, étapes 1 et 2 de la Figure 3. 6, qui est fréquemment utilisé en lieu et place d'une analyse du cycle de vie complète (Figure 3. 7).

L'écobilan permet à lui seul déjà de comparer à l'état brut les émissions que différents systèmes rejettent pour une même fonction, ainsi que les consommations d'énergie et de matière première en général. À ce stade, dans la mesure où la démarche ne comporte pas d'évaluation comparative des impacts que l'on retrouve dans la phase 3, il est peu susceptible d'être affecté par des erreurs d'interprétation. L'intérêt de l'écobilan est qu'il ne contient pas d'erreurs ou d'imprécisions du fait de la limitation du nombre de calculs, et par ailleurs il évite les aspects parfois subjectifs des méthodes de pondération utilisées pour comparer les différentes classes d'impacts.

c) Classes d'impact évaluées

Les différentes classes d'impacts prises en compte dans les ACV peuvent être très nombreuses et variées. D'une manière générale, les suivantes sont les plus fréquemment rencontrées :

- altérations physiques des écosystèmes, c'est-à-dire dégradation des écosystèmes ou des paysages, désertification...
- dégradation de la couche d'ozone, c'est-à-dire diminution de la quantité d'ozone contenue dans la stratosphère, sous l'action de composés chlorés ou bromés notamment,
- effet de serre, sous l'action d'une modification anthropique de la composition de l'atmosphère, augmentant l'effet de serre naturel,
- épuisement des réserves naturelles, qui dépend du niveau des réserves, de la consommation annuelle et d'éventuels taux de renouvellement,
- nuisances, c'est-à-dire bruit, odeurs et impact visuel, qui sont des impacts très dépendants des conditions d'émissions et des récepteurs, et dont l'appréciation quantitative reste délicate,
- toxicité et écotoxicité, qui comprennent tous les impacts potentiellement toxiques pour l'Homme, la faune, la flore ou l'écosystème dans son ensemble. Ces impacts sont parfois simplifiés pour ne retenir que deux d'entre eux, l'acidification du sol ou de l'eau et l'eutrophisation des écosystèmes terrestres ou aquatiques, qui consiste en un déséquilibre des cycles biogéochimiques du fait d'un excès d'apport en éléments nutritifs dans le milieu.

d) Interprétation et recherche d'améliorations

Lors de cette dernière phase, étape 4 de la Figure 3. 6, des conclusions et des recommandations sont formulées, sur la base de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie et de l'évaluation des impacts. Ces conclusions doivent être cohérentes avec l'objectif annoncé de l'étude, et la définition de son champ. Par ailleurs, elles doivent inclure les résultats d'éventuelles études de sensibilité.

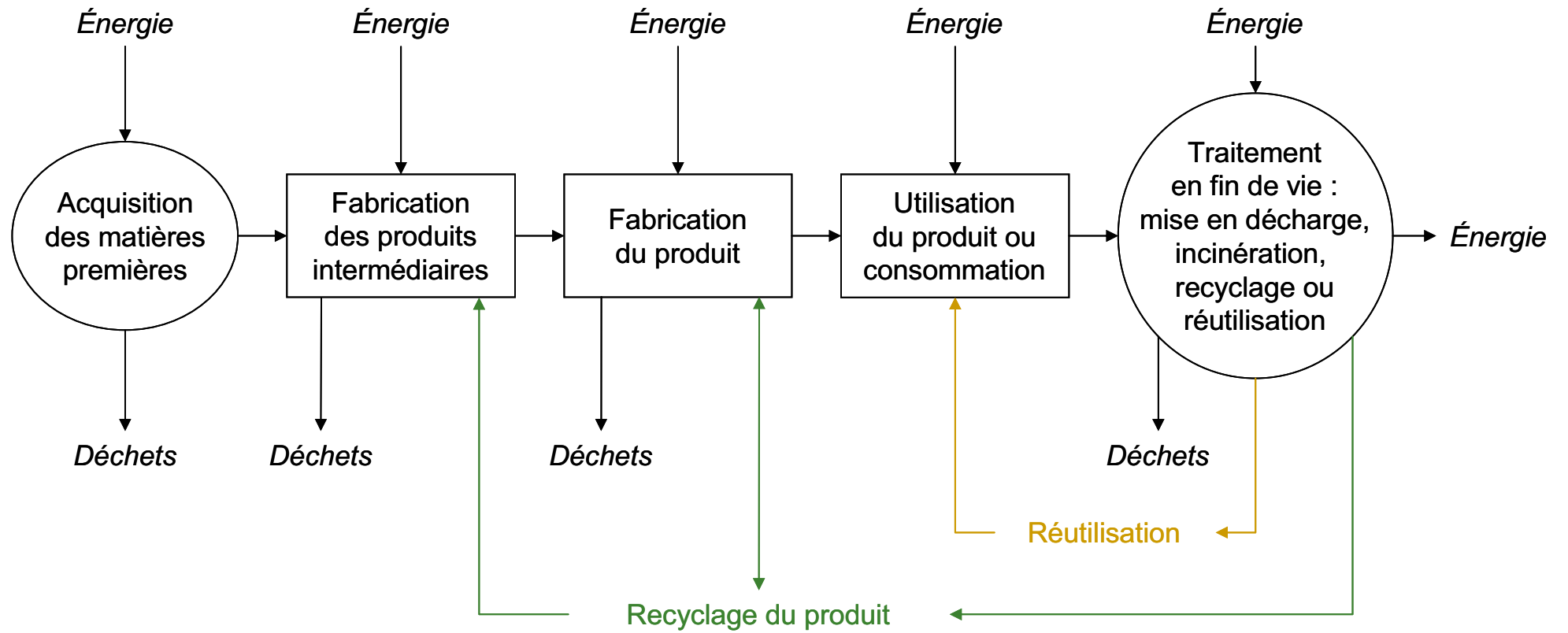


Figure 3. 8 - Diagramme des flux de matières et d'énergie pour l'analyse du cycle de vie d'un produit. D'après Kusko et Franklin, 1998.

Cette quatrième phase peut donner lieu à des itérations, notamment sur la définition du champ de l'étude et sur la définition de la nature et de la qualité des données nécessaires à la réalisation de l'objectif. En revanche, les décisions prises en vue d'actions sur le système sont en-dehors de la phase d'interprétation et de recherche d'améliorations, et même en-dehors de l'analyse du cycle de vie elle-même, dans la mesure où elles impliquent d'autres champs de décision (aspects techniques, économiques ou sociaux).

e) Apports de la méthodologie

La méthodologie d'analyse du cycle de vie permet donc de dresser un bilan exhaustif des divers flux de matière et d'énergie liés au produit, au procédé ou à l'activité étudiés (Figure 3. 8). Par ailleurs, dans la mesure où la globalité du cycle de vie est prise en compte, l'analyse du cycle de vie est bien adaptée aux problématiques actuelles de développement durable et elle constitue un cadre méthodologique adapté pour l'étude des impacts environnementaux des activités humaines.

Elle permet également de prendre en compte ou d'identifier les transferts de pollution : il est possible à l'aide de cette méthodologie d'apprécier l'impact environnemental potentiel d'une décision ou d'une modification de conception en évaluant les changements induits par cette décision, lorsqu'existe un critère quantitatif objectif permettant de relier les flux identifiés dans le système et leurs impacts sur l'environnement.

L'intérêt de la méthodologie ACV réside également dans le fait qu'elle peut être utilisée, soit pour comparer deux systèmes en vue de choisir le plus performant du point de vue environnemental, soit pour identifier, pour un même système, les voies d'amélioration possibles des performances environnementales.

3.3.2 Limites de la méthodologie

Cette méthodologie présente toutefois certains points délicats. Tout d'abord bien sûr, les résultats sont très dépendants de la qualité de la phase de définition, et notamment du choix de l'unité fonctionnelle (Encadré 3. 2). La précision et même la justesse des résultats peuvent être affectées par l'oubli d'une opération dans le cycle de vie, ou par la mauvaise définition des frontières du système. De plus, la qualité des données influe sur la précision des résultats. D'où une observation qui peut paraître au premier ordre paradoxale : outil destiné à améliorer une démarche, l'analyse du cycle de vie, si elle est mal mise en œuvre, peut conduire à des contre-résultats. Cette remarque vaut d'ailleurs pour toute démarche méthodologique dès lors qu'elle est confrontée à des approches plus heuristiques.

a) Aspects mal traités par l'analyse du cycle de vie

Les limites principales de cette méthodologie résident toutefois dans la manière dont elle traite les différentes échelles d'impacts, tant sur le plan des échelles spatiales que des échelles temporelles (Tableau 3. 1).

Les échelles d'impacts s'étendent de l'échelle globale (effet de serre, etc.) à des échelles très locales (pollution des eaux). L'agrégation utilisée dans l'évaluation des impacts conduit à une perte d'information sur l'échelle spatiale. Cette perte d'information n'est pas importante dans le cas des impacts globaux tels que l'effet de serre, mais s'amplifie au fur et à mesure que l'échelle d'observation diminue. Dans le cas des impacts globaux, les paramètres ayant le plus d'importance sont principalement la nature et la quantité des composés émis. En revanche, dans le cas des impacts très localisés, les caractéristiques et la situation de la source sont également indispensables pour donner une description précise des effets induits.

Tableau 3. 1 - Classification des impacts et leurs échelles. D'après Rousseaux, 1998 et Khalifa, 1999.

Classe	Sous-classe	Échelle géographique	Échelle temporelle
Altération physique des écosystèmes		Locale ou régionale	Décennies ou années
Dégradation de la couche d'ozone		Globale	Siècles ou décennies
Effet de serre		Globale	Siècles ou décennies
Épuisement des réserves naturelles		Globale ou régionale	Siècles ou décennies
Nuisances	Bruit	Locale	Années, jours, heures
	Odeur	Locale	Années, jours, heures
	Visuel	Locale	Années, jours, heures
Toxicité et écotoxicité	Toxicité : homme, faune, flore et écosystèmes	Locale	Décennies ou années
	Acidification	Régionale	Années
	Eutrophisation	Locale	Années

La perte d'information est également importante sur l'échelle temporelle. Ainsi, d'une part, le niveau d'un impact dépend de l'intensité de l'émission et des caractéristiques de la source et, d'autre part, ces impacts se produisent sur des échelles de temps très variables. La dynamique des processus étudiés n'est donc pas bien décrite par les analyses du cycle de vie.

Enfin, les relations utilisées actuellement pour quantifier les impacts sont souvent linéaires (impacts proportionnels aux flux du composé considéré), ce qui exclut de tenir compte, par exemple, d'effets seuil ou de non linéarités dans les comportements.

b) Aspects non traités par l'analyse du cycle de vie

En conséquence des aspects déjà décrits précédemment, ce sont essentiellement deux aspects qui ne sont pas traités par les analyses du cycle de vie : d'une part la dynamique des systèmes étudiés et l'influence de cette dynamique sur les résultats obtenus et d'autre part les liens entre les échelles et les relations de passage entre ces différentes échelles.

Dynamique des systèmes

Toute la méthodologie d'analyse du cycle de vie est basée sur la définition d'une unité fonctionnelle, à laquelle sont rapportés les différents flux recensés. Cette unité fonctionnelle contient un indicateur de fonction, d'espace et de temps. Par conséquent, tous les résultats seront moyennés sur la période de référence correspondant à la définition de l'unité fonctionnelle.

Le système de stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers est un système dynamique, dont les performances dépendent du temps. Or la méthodologie d'ACV ne tient pas compte de l'évolution au cours du temps, mais considère des valeurs moyennées sur tout le cycle de vie du système. Il devient dès lors réducteur de limiter la définition du système à une unité de temps et d'espace.

L'utilisation d'études de sensibilité ne suffit pas à elle seule à pallier ce manque dans la méthodologie : s'il est possible de simuler les résultats pour différentes unités fonctionnelles, ayant chacune un horizon temporel différent, ce type de méthode est fastidieux et peu pertinent, dans la mesure où un trop grand nombre de simulations serait nécessaire pour rendre compte de la réalité du système.

Liens entre les échelles

De la même façon que précédemment, dans la mesure où tous les impacts sont agrégés aussi bien dans l'espace que dans le temps, il n'est pas envisagé de faire un lien entre les effets aux différentes échelles dans les analyses du cycle de vie. Lorsqu'un seul impact est envisagé, comme c'est le cas si l'étude se concentre sur l'effet de serre par exemple, l'échelle de l'étude peut être soit l'échelle de l'impact lui-même, dans ce cas l'échelle globale, soit l'échelle du système qui est étudié. Si l'étude porte sur un cas particulier précisément renseigné, il s'agira alors plutôt d'une échelle locale.

D'une manière plus générale, la méthodologie d'analyse du cycle de vie ne permet pas de différencier explicitement les échelles d'intervention ou d'impacts des systèmes. Il s'agit bien d'une vision systémique, mais qui permet difficilement de décrire la globalité d'un système qui met en jeu les différentes échelles. La problématique de lutte contre l'intensification de l'effet de serre est une problématique globale, l'impact « réchauffement » ayant lui-même des conséquences à une échelle planétaire.

Encadré 3. 3 - ACV existantes sur les produits du bois.

De même que pour de nombreux produits industriels, des études ont été réalisées pour évaluer les impacts environnementaux des produits issus du bois, dans un premier temps en se basant plutôt sur les bilans énergétiques des procédés d'obtention, puis en évaluant les bilans à la fois sur l'énergie et sur les différents flux de matière [Richter, 1998]. La première étude de ce type s'approchant le plus de la méthodologie ACV a été réalisée en 1990 [Meier, 1990], et par la suite de nombreuses études ont suivi, comparant les produits en bois aux autres produits industriels équivalents (Tableau 3. 2).

Tableau 3. 2 - Bilan récapitulatif d'ACV de produits en bois.

Référence	Produits étudiés	Matériaux substitués
Meier, 1990	Bois construction	-
Zapke et Gerken, 1993	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
Kohler et al., 1994	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
Kasser et Pöll, 1995	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
SIA, 1995	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
Richter et Gügerli, 1996	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
Frühwald, 1997	Panneaux, sciages, lamellé-collé	-
Richter, 1998	Fenêtres	Aluminium, acier, PVC
CTBA, 1998	Palettes	-
Börjesson et al., 2000	Bois construction	Béton
Ecobilan, 2000	Caisses	Plastique, carton

Cependant, la mise en œuvre d'actions sur les forêts, visant à limiter cet accroissement anthropique de l'effet de serre, ne peut se faire qu'à des échelles locales, par la mise en place de projets. La conception des différents projets devra intégrer les contraintes locales liées à chaque situation, mais aussi prendre en compte les éventuels effets induits par le projet lui-même, qui peuvent, eux, avoir des conséquences à des échelles supérieures (régionales voire continentales). Il est donc important pour ce type d'étude de pouvoir prendre en compte différentes échelles, ainsi que les relations entre ces échelles et les modes de passages d'une échelle à une autre.

3.4 Objectifs retenus pour cette étude

3.4.1 Orientation du travail sur les trois directions principales

L'étude porte principalement sur l'évaluation de la contribution potentielle des forêts à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre, par la capture et le stockage du carbone. Trois directions principales se distinguent dans cet objectif parmi toutes les fonctions attribuées aux forêts : la fonction stockage de carbone bien sûr, mais aussi les productions de bois matériau et de bois énergie. Ces deux dernières fonctions sont particulièrement pertinentes vis-à-vis de la problématique carbone puisqu'elles ont à la fois un rôle de stock et un double rôle de substitution, directe quand il s'agit de substituer le bois aux énergies fossiles carbonées, et indirecte lorsqu'il s'agit de substituer le bois à des matériaux dont la fabrication est plus coûteuse en énergie.

D'autres fonctions peuvent être couplées au stockage du carbone, dans une logique multifonctions, comme la biodiversité ou d'autres usages de préservation du milieu naturel par exemple. Ces fonctions, sans être ignorées, sont cependant écartées de l'étude quantitative, même si leur intérêt est significatif, comme c'est le cas par exemple dans les cas présentés Encadré 3. 4 et Encadré 3. 5.

Le choix de ces fonctions vient également du fait que ce sont justement les principales fonctions des forêts vis-à-vis des usages anthropiques, et qu'elles sont la plupart du temps couplées à l'une ou l'autre des autres fonctions. Les forêts productives représentent en effet presque 70 % des surfaces mondiales de forêt. Il est donc vraisemblable que les terres boisées nouvellement mises en place pour des fonctions environnementales ou pour des usages collectifs ou industriels seront également des forêts de production de bois.

L'intérêt de centrer l'étude sur ces trois principales fonctions, sans exclure totalement de la réflexion les autres usages, est de traiter également de la place de la biomasse énergie dans le panorama mondial. Le stockage, par extension, peut en effet être défini à la fois par la capture de carbone par les écosystèmes lors de la photosynthèse, mais aussi par la substitution du bois aux différentes matières déjà évoquées précédemment. Ces aspects sont abordés par des études précédentes portant sur l'ACV de différents produits en bois (Encadré 3. 3).

Les combinaisons entre les différentes fonctions sont nombreuses, même en se limitant seulement aux deux fonctions de production, matière et énergie, et à la fonction environnementale globale qu'est le stockage de carbone. Aussi est-il utopique de prétendre à une étude exhaustive des diverses configurations possibles. Il est en revanche possible de présenter les cas, sinon représentatifs, du moins typiques des diverses situations réelles. La variété des modes de productions, du fait des différents marchés des produits du bois, essences, conditions pédo-climatiques, qui peuvent varier de façon importante en fonction des régions, fait que seule une étude de terrain particulière peut à terme rendre compte avec précision de telle ou telle réalité opérationnelle.

**Encadré 3. 4 - Réduction du coût de stockage de carbone par des usages multi-fonctions des forêts ; un exemple :
l'utilisation du saule pour les taillis à courte rotation en Suède.**

Le coût du seul stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers est évalué selon les études à une valeur comprise entre 5 et 75 €/tC. Les pénalités pour émissions excessives de dioxyde de carbone sont elles fixées à 40 €/t CO₂ à l'horizon 2007 et à 100 €/t CO₂ à l'horizon 2012. Par ailleurs, le coût de la capture et du stockage géologique du carbone est lui de l'ordre de 30 à 60 €/t CO₂.

Le coût du stockage de carbone dépend bien sûr d'un grand nombre de facteurs, parmi lesquels se trouvent l'intensité et l'efficacité de production de la biomasse, l'utilisation éventuelle et donc la valorisation du bois produit et également des paramètres spécifiques au site de plantation. Malgré la grande variabilité des coûts en fonction des régions et des différents paramètres évoqués, il est possible d'évaluer dans certains cas le potentiel de réduction que recèlent les usages multi-fonctions des forêts.

C'est le cas par exemple pour les systèmes agroforestiers ou dans certaines autres configurations où plusieurs usages peuvent être couplés. L'exemple de la production de bois énergie par les taillis à courte rotation est également significatif : le coût du stockage et de la réduction des émissions de CO₂ dépend dans ce cas essentiellement du type d'énergie substituée [Börjesson et Berndes, 2002], mais il peut être réduit significativement dans le cas où la plantation est irriguée par des eaux usées. Dans ce cas, les avantages environnementaux sont multiples, puisque l'eau est au moins partiellement traitée, la plantation est fertilisée et sa productivité augmente, ce qui entraîne des diminutions de coûts à différents niveaux (fertilisation, traitement des eaux, gestion des déchets de traitement...).

Encadré 3. 5 – Le stockage de carbone et la biodiversité ?

L'objectif de stockage de carbone peut être exprimé et formalisé selon différents critères. D'une manière générale, il est possible de raisonner soit en termes de stock, soit en termes de flux : l'objectif de stockage peut alors être traduit quantitativement soit comme un stock à maximiser, soit comme un flux à maximiser.

Sans tenir compte des contraintes pédo-climatiques ou des autres facteurs limitants et en ne retenant que le type de gestion des écosystèmes forestiers, les flux maximaux de stockage, autrement dit la productivité maximale, sont obtenus pour les forêts de plantation. Ces écosystèmes sont en effet caractérisés par une productivité maximale, et par ailleurs par une biodiversité minimale.

Il serait cependant évidemment faux de conclure que d'une manière générale, le stockage de carbone et la préservation d'une certaine biodiversité sont des objectifs systématiquement contradictoires. Certaines études [Baskin, 1994, *et al.*, 2002] montrent en effet l'impact positif de la biodiversité sur la productivité des systèmes, et donc sur la quantité annuelle de carbone stocké. L'importance du nombre d'espèces présentes dans l'écosystème aurait donc un effet positif sur la quantité totale de matière contenue dans le système, de même que sur l'accroissement annuel du stock.

Cependant, à la lumière d'études de cas, il est possible de distinguer les principales contraintes et les principaux potentiels d'une manière générale, qu'il suffit d'adapter ensuite à chaque cas particulier et à ses spécificités. L'objet de la présente étude est donc de décrire des schémas caractéristiques permettant de déduire les principales tendances, et pouvant être facilement utilisées ensuite dans des cas spécifiques.

3.4.2 Indicateurs de comparaison entre les systèmes

a) Caractérisation de l'efficacité de stockage de carbone

Pour comparer les différents systèmes entre eux du point de vue du stockage de carbone, il est possible de définir des rendements de stockage ou des efficacités. Pour définir un rendement du stockage, il convient dans un premier temps de définir le flux de carbone utile, noté F_U : ce flux correspond à la somme de l'accroissement annuel du stock dans l'écosystème et de la quantité de carbone récoltée annuellement. Dès lors, plusieurs grandeurs, peuvent être définies.

La relation liant ce flux de carbone utile, exprimé en tC/an, aux grandeurs déjà définies auparavant est la suivante :

$$F_U = xB + \Delta SE \quad (3.1)$$

Deux rendements peuvent alors être définis pour le système biologique :

- un rendement « brut », rapport du flux utile de carbone à la production primaire brute, soit F_U/PPB ,
- un rendement « net », rapport de F_U à la production nette de l'écosystème, soit F_U/PNE .

Ces deux rendements sont liés par un facteur fonction de la respiration et de la production de l'écosystème :

$$F_U/PPB = (F_U/PNE) \cdot (PNE/(PNE+R_a+R_n)) \quad (3.2)$$

Le stockage peut également être caractérisé par plusieurs autres grandeurs, définies comme des efficacités :

- efficacité de substitution, définie comme le rapport de la somme de la quantité de carbone évitée et de carbone stocké, à la quantité de carbone émis sur tout le cycle de stockage, depuis la capture et le stockage sur pied jusqu'à l'utilisation du bois énergie,
- efficacité de récolte, définie comme la quantité de carbone récoltée sur le flux utile de carbone,
- efficacité d'utilisation de la récolte, définie comme le rapport de la masse de bois effectivement utilisée à la masse de bois récolté,
- efficacité de stockage sur pied, définie comme l'accroissement annuel du stock de carbone sur le flux utile.

b) Caractérisation de l'efficacité énergétique

De même que pour la fonction « stockage », plusieurs grandeurs caractéristiques, rendements ou efficacités, peuvent être définies pour la fonction « production d'énergie » du système global. Le rendement « classique » de ce type de système est défini comme le rapport de l'énergie utile fournie par le seul système de production d'énergie sur l'énergie entrante : il s'agit du rendement de conversion du dispositif.

D'autres grandeurs peuvent être définies, sur le même principe que précédemment, comme des efficacités :

- efficacité d'utilisation énergétique de la biomasse, définie comme le rapport de l'énergie utile sur la quantité totale d'énergie fossile utilisée dans toute la filière,
- efficacité de substitution énergétique, définie comme le rapport de l'énergie utile sur l'équivalent en énergie correspondant aux émissions de carbone fossile évitées.


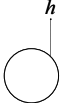


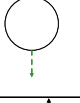

	Opération
	Intitulé de l'opération
	Flux de matière entrant et sortant
	Bilan d'énergie externe consommée par l'opération
	Pertes de matière
	Émissions de C externes liées à l'opération

Figure 3. 9 - Symboles utilisés dans les schémas opérationnels décrivant chaque cas d'étude

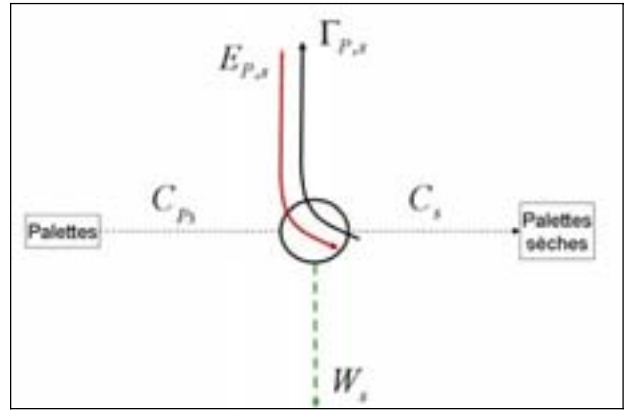


Figure 3. 10 - Détail des flux pour l'opération de séchage

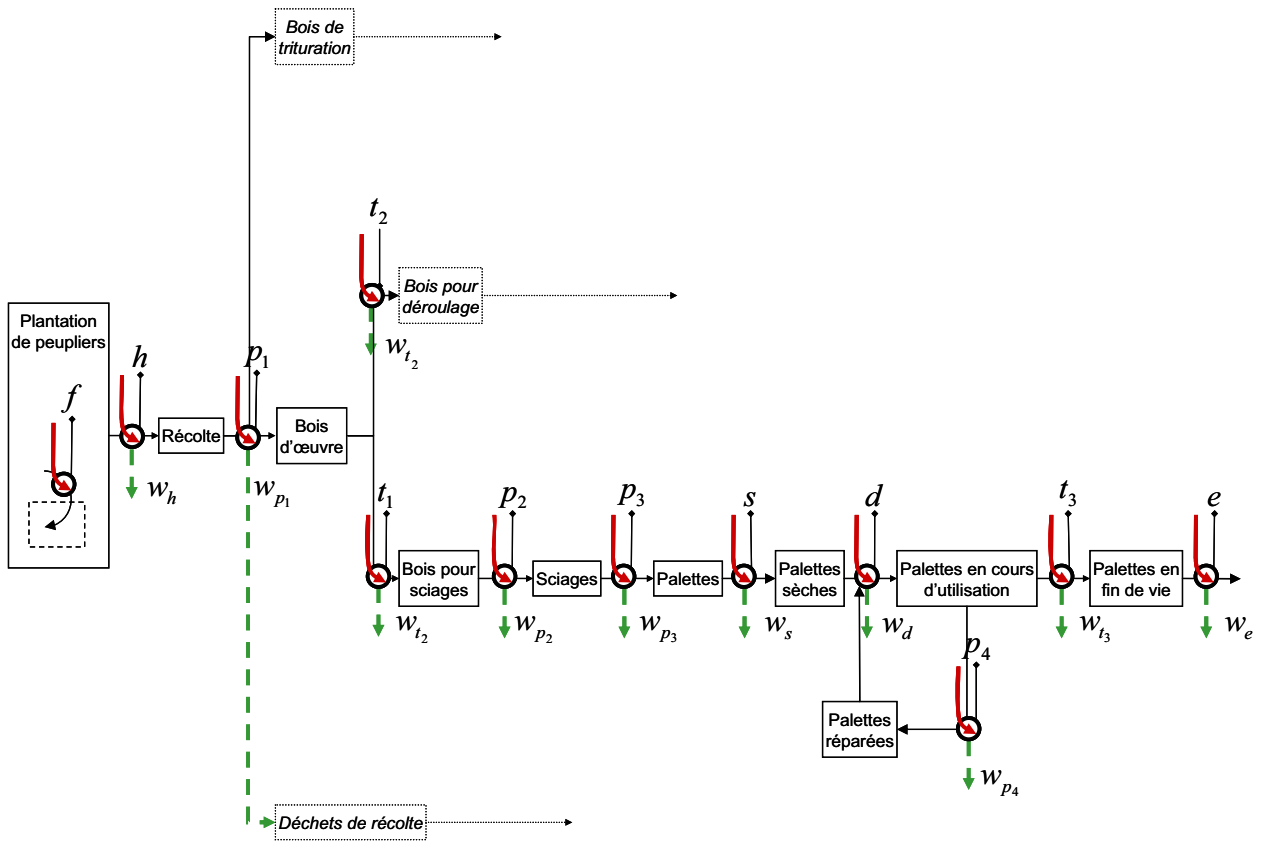


Figure 3. 11 - Schéma opérationnel de l'utilisation des forêts de peuplier pour la production de palettes

Certaines grandeurs peuvent être définies à la fois sur le système global « système biologique + système de production de bois » et sur chaque système individuellement. Cependant, dans ce cas, le rendement global n'est pas égal au produit des deux rendements individuels, du fait notamment que dans les deux systèmes, il existe des intrants en énergie fossile différents.

3.5 Les sept cas étudiés et la démarche proposée

3.5.1 Les sept cas étudiés

Hormis quelques exemples précis, sept principaux cas d'étude ont été retenus pour décrire les différentes configurations possibles utilisant les écosystèmes forestiers pour le stockage du carbone. Ces cas reprennent les trois principales directions identifiées, seul stockage de carbone, production de bois matériau et production de bois énergie, à différentes échelles, locales, régionales et globale, dont un bilan est proposé dans le chapitre 7 de ce document.

Sept études de cas sont retenues dans cette étude. Elles sont regroupées en trois chapitres, chacun d'entre eux correspondant à une des trois directions principales identifiées. Les deux premières études de cas (cas I et cas II) illustrent la fonction de stockage de carbone, la suivante (cas III) présente la fonction de production de bois pour divers usages et les trois dernières (cas IV, cas V, cas VI et cas VII) exposent la fonction de production d'énergie à partir du bois.

- Cas I : il s'agit ici de la configuration la plus simple, où à partir de surfaces non initialement boisées, une forêt est établie. Aucune action anthropique n'est envisagée sur le peuplement après la plantation, c'est-à-dire que la croissance est laissée libre. Dans ce cas, l'échelle retenue est plutôt une échelle locale, celle de la parcelle. La seule fonction envisagée pour la plantation est celle de stockage de carbone.
- Cas II : la fonction principale retenue dans le cas II est une fois encore celle de stockage de carbone. Mais contrairement au cas I, il est envisagé ici d'entretenir la parcelle, sous la forme d'éclaircies régulières censées améliorer la productivité des forêts et par conséquent son stockage de carbone. De ce fait, une certaine quantité de bois est produite et exportée hors de la parcelle à intervalles réguliers, et il devient nécessaire de prendre en compte le devenir de cette matière exportée. Le cas II inclut donc une fonction secondaire de production de bois.
- Cas III : dans le cas III, la description est faite à l'échelle d'un massif, le massif des Landes d'Aquitaine, donc à l'échelle régionale, pour un peuplement dont la fonction principale est celle de production de bois utilisé pour plusieurs lignes de produits différentes. Ce système est en régime pseudo-permanent.
- Cas IV : le premier des cas portant sur la production de bois énergie est celui où le peuplement forestier est établi uniquement pour un usage énergétique. Plus précisément, l'étude porte sur le cas du taillis à courte rotation. C'est donc un exemple à l'échelle de la parcelle, soit à une échelle locale.
- Cas V : le cas V porte lui aussi sur la production de bois énergie, mais cette fois comme une production secondaire de la parcelle, en plus du bois d'œuvre.
- Cas VI : enfin, le dernier type de ressource pour le bois énergie est constitué des différents déchets produits à la fois lors de la récolte et lors des différentes transformations du bois. C'est l'objet de l'étude de cas VI.

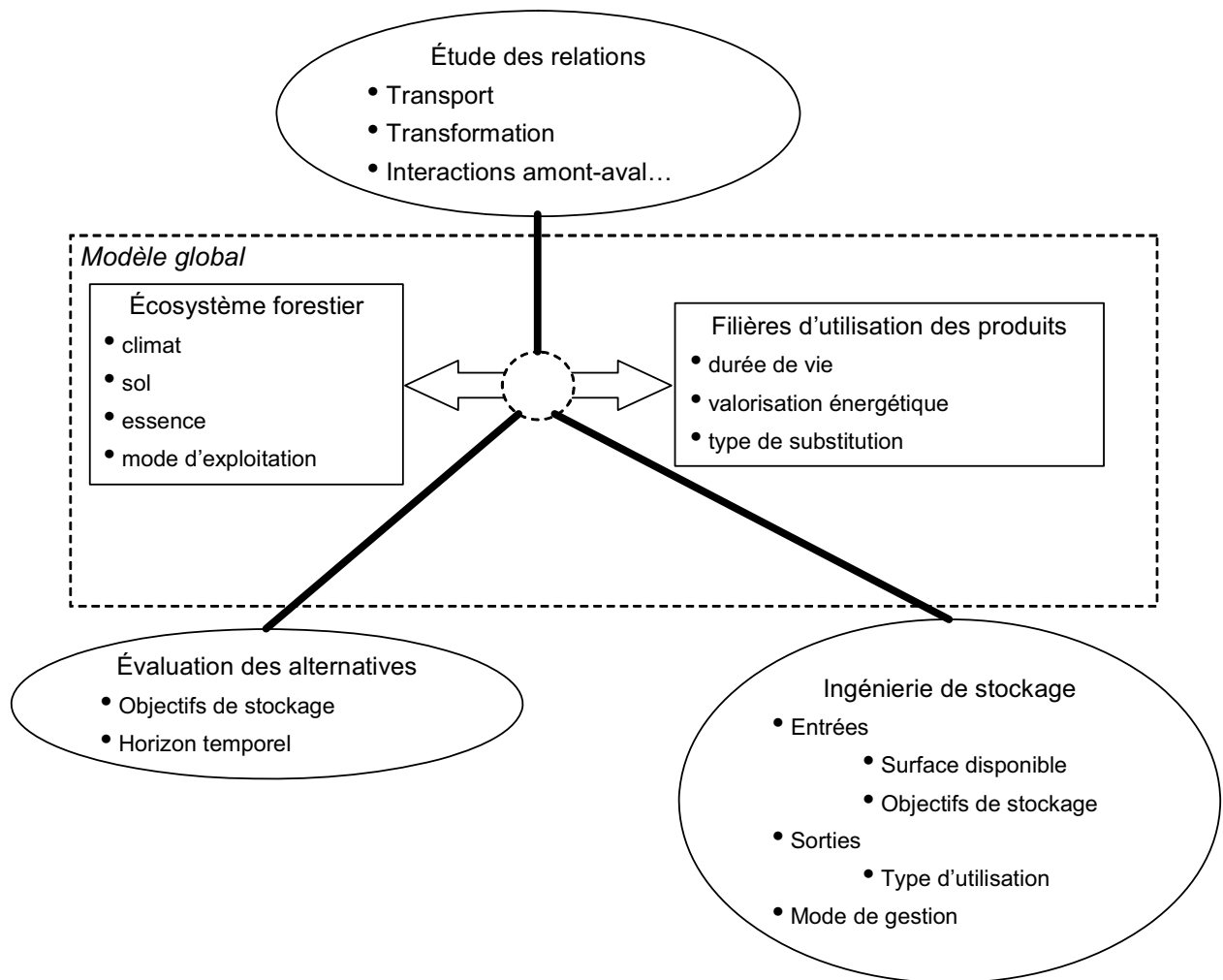


Figure 3. 12 - Schéma de la démarche proposée

- Cas VII : le dernier cas d'étude compare, à l'échelle globale, l'usage des terres disponibles pour le seul stockage et pour la production de bois énergie. Cette comparaison est faite par rapport à une référence, constituée par les émissions potentielles des différentes ressources fossiles.

3.5.2 Application et adaptation de l'Analyse du Cycle de Vie

La présente étude vise, comme il a déjà été précisé auparavant, à évaluer le potentiel de contribution des écosystèmes forestiers et de la filière bois à la limitation de l'intensification de l'effet de serre, sous l'effet d'actions anthropiques. Du point de vue strict de l'analyse du cycle de vie, une fonction précise peut être définie, et donc une unité fonctionnelle peut se dégager, exprimée par exemple comme une quantité de carbone, ou d'équivalent CO₂, stockée ou non émise, par unité de surface et sur une période d'observation donnée. Mais il est délicat de découpler, dans le cas des écosystèmes forestiers, la seule fonction de stockage de carbone de l'ensemble des autres fonctions identifiées, qui sont fortement liées et souvent indissociables.

C'est d'ailleurs dans la combinaison de ces différentes possibilités, une sorte de démarche « multi-fonctions » ou « multi-usages » en quelque sorte, que seront justifiés des projets de gestion forestière d'une réelle ambition. La combinaison de plusieurs types de fonctions peut en outre permettre de résoudre certaines contraintes, qu'elles soient techniques (comme par exemple les conflits pour l'usage des sols) ou économiques (plusieurs utilisations peuvent amener à réduire significativement les coûts). Deux exemples illustrent bien la manière dont ce type de contrainte peut être résolu par un usage multiple des surfaces boisées. Une contrainte importante sur l'usage des sols est celle liée à la demande alimentaire, et donc aux surfaces agricoles minimales nécessaires. La mise en place de systèmes agroforestiers, combinant à la fois les systèmes agricoles et la sylviculture, peut en partie résoudre ce type de conflit et permettre la mobilisation de surfaces supplémentaires pour le stockage de carbone. Ces systèmes peuvent en outre dans certaines régions, notamment dans les zones montagneuses, contribuer à la conservation des réserves en eau douce, du fait de la limitation du ruissellement des eaux de pluie sur certains bassins versants. En ce qui concerne les contraintes économiques, l'usage des surfaces boisées à la fois pour le traitement d'eaux usées, pour la production de bois énergie et pour le stockage du carbone se montre particulièrement efficace pour réduire les coûts d'aménagement des surfaces boisées.

L'action des forêts sur le carbone atmosphérique n'est pas simplement l'effet de la croissance des écosystèmes. Elle est couplée directement à d'autres fonctions, notamment aux fonctions de production de matériau et d'énergie, et elle est également couplée, indirectement, à d'autres fonctions environnementales comme la préservation de la biodiversité, la lutte contre l'érosion, la préservation des microclimats ou le traitement des eaux.

La définition d'une unité fonctionnelle tenant compte de ces différents aspects est alors nécessairement réductrice. Le point de vue utilisé pour évaluer le potentiel des forêts à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre doit donc être plus large que la vision strictement systémique proposée par les analyses du cycle de vie.

Le couplage entre les échelles doit également être pris en compte, pour traduire l'ensemble des implications de l'utilisation des écosystèmes forestiers pour agir sur l'évolution de la teneur atmosphérique en carbone. L'estimation doit pouvoir tenir compte des effets à l'échelle globale et à des horizons temporels différents, des actions unitaires effectuées à l'échelle opérationnelle, donc à une échelle locale. Le but principal de ce point de vue est de s'assurer que les forêts ne soient pas utilisées pour la limitation de l'effet de serre au détriment d'une autre fonction, environnementale ou non.

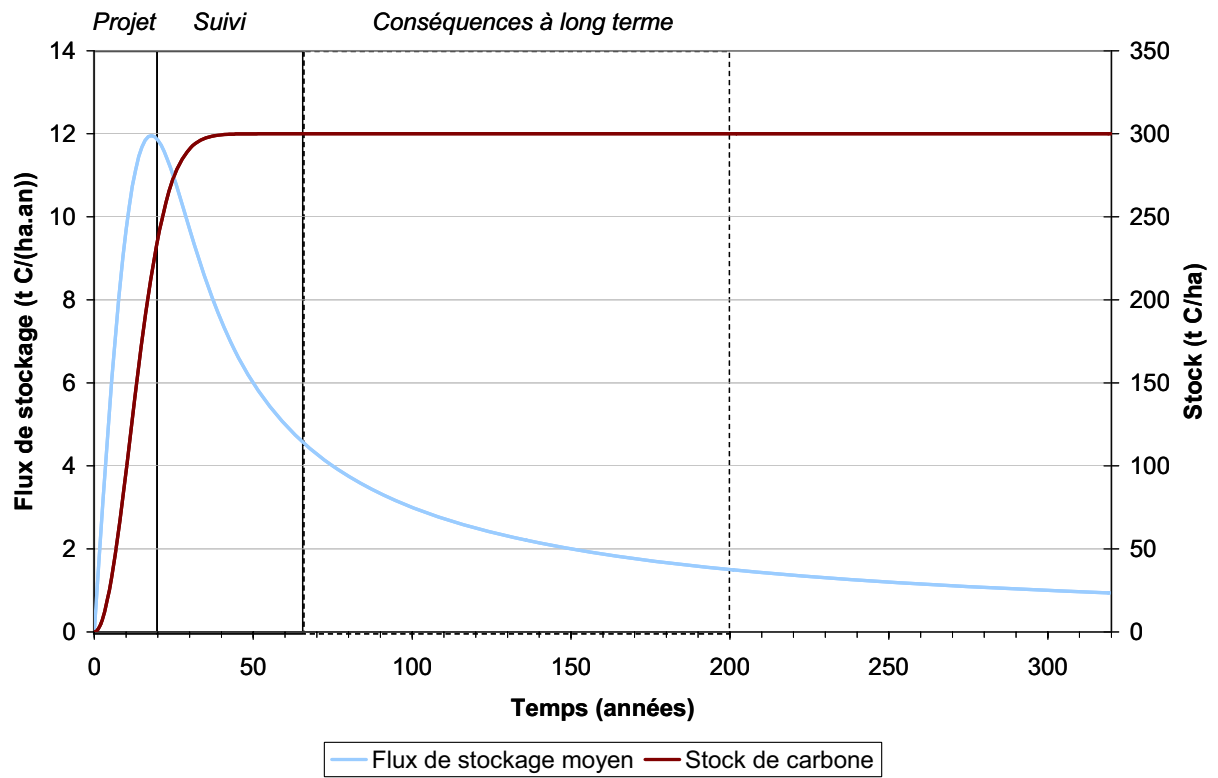


Figure 3. 13 - Influence du temps sur le stockage de carbone. Cas d'un peuplement indigène non exploité en Amazonie (courbes établies d'après les données de Mégevand, 2001.

3.5.3 Démarche proposée

Trois dimensions principales caractérisent l'utilisation des forêts par l'Homme : le niveau de fonction ou la fonction auquel ou à laquelle il est fait appel, la dimension temporelle et la dimension spatiale. Il s'agit donc de comprendre comment ces différents aspects interagissent dans l'utilisation des écosystèmes forestiers et, partant, d'adapter la logique d'analyse du cycle de vie à cette problématique dans l'objectif d'évaluer la contribution potentielle de ces écosystèmes à la résolution de la problématique générale de l'intensification de l'effet de serre (Figure 3. 12).

Pour chacun des 7 cas étudiés, à partir d'un schéma opérationnel décrivant de manière exhaustive les flux de matière (bois ou carbone) et d'énergie mis en jeu (Figure 3. 9), deux bilans sont dressés, un bilan d'énergie et un bilan de carbone. Ces deux bilans permettent de mettre en évidence les paramètres pertinents et les goulots d'étranglement qui caractérisent chaque système vis-à-vis de sa fonction de stockage de carbone. Ainsi, à titre d'illustration, un schéma opérationnel est présenté Figure 3. 11 pour le cas de la production de bois de peuplier pour la fabrication de palettes. Dans ce cas précis, l'opération de séchage (Figure 3. 10) constitue le poste qui consomme le plus d'énergie. Il peut constituer alors un paramètre d'optimisation du bilan net de carbone de toute la filière (mode de séchage, type d'énergie utilisée, séchage avant ou après montage des palettes...).

3.5.4 Rôle du temps

Les aspects temporels sont particulièrement importants à prendre en compte dans ce type de problématique. Contrairement à la plupart des produits industriels dont les impacts environnementaux sont étudiés à l'aide de la méthodologie d'analyse du cycle de vie, l'utilisation des écosystèmes forestiers pour le stockage du carbone ne peut pas être appréhendée uniquement en régime permanent. L'évolution des systèmes au cours du temps, de leurs dynamiques, induisent des différences, en termes de stockage de carbone par exemple (Figure 3. 13).

Il est possible de distinguer différents régimes d'évolution des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers et la filière bois dans son ensemble :

- Des régimes établis, se répartissant en deux catégories principales :
 - Les régimes permanents : dans le cas d'un écosystème évoluant librement, un régime permanent peut être atteint, quand l'équilibre des flux se fait, la production de biomasse étant compensée par la mortalité.
 - Les régimes pseudo-permanents périodiques : les écosystèmes gérés ou entretenus peuvent être considérés comme étant en régime périodique.
- Des régimes instationnaires : partant d'une situation initiale peu ou faiblement boisée, un peuplement forestier s'établit, augmentant le stock de carbone de l'écosystème. Dans le cas d'un écosystème évoluant librement, le régime instationnaire dure jusqu'au stade climax. Dans le cas d'un écosystème géré ou entretenu, le régime stationnaire dure jusqu'à l'établissement d'un régime pseudo-permanent périodique.

Dans chacun des cas, il apparaît que le stockage pur, que ce soit dans l'écosystème ou dans les produits du bois, n'a d'effet que durant la constitution du stock et s'annule par la suite, lorsque le régime établi apparaît. Il importe donc de situer le cas d'étude par rapport à ce régime établi. En revanche, dans le cas de l'effet de substitution, l'impact est permanent, puisqu'il est cumulatif. Mais dans ce cas, l'intérêt de l'utilisation des écosystèmes forestiers n'apparaît qu'en comparaison à l'utilisation d'énergies fossiles carbonées, directe dans le cas de l'énergie ou indirecte dans le cas des matériaux. Un autre horizon temporel peut alors être défini, il s'agit de la durée de consommation des ressources, fossiles ou autres, à un rythme de consommation donné.

Encadré 3. 6 - Exemples de projets de puits de carbone existant.

Plusieurs opérations de mise en place de puits de carbone ont déjà été réalisées (Tableau 3. 3), le plus souvent par de grands groupes industriels. Ces projets consistent tous en du boisement de terrains agricoles ou de zones dégradées.

Tableau 3. 3 - Tableau récapitulatif de projets de puits de carbone forestiers et leurs principales caractéristiques.

	Lieu	Utilisation du bois	Surface (ha)	C stocké (Mt C)	Coût (€/t C stocké)
Fonds Prototype Carbone	Moldavie	Bois énergie et matériau	14654	0,5	23,2
	Brésil	Charbon de bois	23100	0,8	73,6
	Roumanie	Bois matériau	6728	0,3	30,2
Peugeot S.A.*	Brésil	-	10000	2	5
Total Fina Elf	France	Bois matériau	?	?	?
STMicroelectronics	Maroc	?	10000	1,6	?

*à noter que ce puits de carbone n'est pas éligible au regard des critères de Kyoto

Les flux et stocks de carbone seront donc définis par rapport à chacun de ces régimes et à des horizons temporels chaque fois qu'il conviendra de bien préciser. Les horizons temporels retenus peuvent être les suivants :

- Durée d'observation de l'influence des écosystèmes (cas I et II),
- Durée d'établissement des stocks ou du régime permanent ou pseudo-permanent (cas III, IV, V et VI),
- Durée d'épuisement des réserves (cas VII).

Ces études de cas peuvent également participer à la mise en place d'une méthodologie plus générale pour l'évaluation des projets de stockage de carbone à l'échelle globale, déjà existant (Encadré 3. 6) ou à mettre en place. Cette méthodologie devra être mise en regard des critères d'éligibilité déjà définis par le protocole de Kyoto, qui sont rappelés en Encadré 3. 7.

3.5.5 Application de la démarche aux cas d'étude

Dans le cadre de la présente étude, il ne s'agit pas de réaliser une analyse du cycle de vie complète du système de stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers, mais bien plutôt de limiter la démarche dans un premier temps au bilan sur les gaz à effet de serre. Il ne s'agit donc en cela pas d'une ACV au sens strict. Cependant, l'idée directrice principale de la méthodologie, qui consiste à appréhender un système d'un bout à l'autre de son cycle de vie, dans un souci d'exhaustivité, est conservée ici.

Par ailleurs, sur un certain nombre d'autres points, la démarche se distingue un peu de la méthodologie d'analyse du cycle de vie. La vision adoptée ici se veut multi-fonctions et multi-échelles, ce qui se démarque de la définition du système de la première étape d'une analyse du cycle de vie. Trois fonctions sont en effet étudiées conjointement, et leurs effets sont évalués aux échelles locales et à l'échelle globale : la fonction de stockage de carbone bien sûr, mais aussi deux fonctions de production, de matériau d'une part, et de biomasse énergie d'autre part.

L'application de cette démarche est faite sur plusieurs cas de figures, dans le but de rendre compte d'une certaine diversité des configurations possibles, à des échelles spatiales différentes, qui traduisent également les disparités et hétérogénéités locales qui sont cachées dans les évaluations globales, nécessairement homogénéisées. Les cas retenus sont les suivants : stockage de carbone comme seule fonction de l'écosystème, utilisation à une échelle régionale d'une production de bois et utilisation à l'échelle globale et à l'échelle opérationnelle du bois pour la production d'énergie.

La démarche proposée se base sur les étapes suivantes :

- Identification des systèmes types ou représentatifs de la problématique, ce qui s'approche en fait de la phase de définition du système dans l'analyse du cycle de vie,
- Identification des flux de carbone et d'énergie, en distinguant les flux de carbone échangés par la biomasse des flux de carbone issus de l'utilisation d'énergie fossile et de la même manière pour les flux d'énergie, en distinguant les flux d'énergie échangés par la biomasse de ceux liés à l'utilisation d'énergie fossile. Cette étape est bien sûr très proche de l'étape d'inventaire du cycle de vie.
- Mise en place des bilans de carbone et d'énergie, sur la base des résultats de l'étape précédente,
- Études de sensibilité et évaluation des incertitudes ou de la précision des résultats,
- Identification des paramètres pertinents et des facteurs limitants.

Encadré 3. 7 - Critères de définition et d'éligibilité au sens du protocole de Kyoto d'un projet de stockage de carbone : comment prendre en compte les gains de carbone dans la gestion forestière ?

Trois types d'actions sont possibles sur les écosystèmes forestiers pour limiter l'augmentation de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone. La première est la conservation du stock de carbone. Il s'agit de protéger les forêts contre le déboisement, contre les incendies ou autres catastrophes naturelles, de limiter les pertes lors de l'exploitation ou de conserver les sols par de meilleures pratiques sylvicoles par exemple.

Le deuxième type d'action consiste à augmenter le stock de carbone. Deux modes sont alors possibles : soit augmenter les surfaces de forêts par l'établissement de nouvelles plantations, par la régénération des forêts dégradées ou par des pratiques d'agroforesterie, soit augmenter le stock sur pied par des pratiques sylvicoles différentes, comme la futaie irrégulière ou plus généralement l'enrichissement des forêts secondaires.

Enfin, le troisième et dernier type d'action est la gestion des produits du bois soit par la substitution de la biomasse forestière directement aux énergies fossiles carbonées ou indirectement en remplaçant des matériaux dont la fabrication est très coûteuse en énergie, soit par l'allongement du cycle de vie des produits du bois, qui permet d'augmenter le stock de carbone contenu dans la filière aval de la forêt.

Le terme « puits de carbone » désigne quant à lui un type de projet bien particulier. Un projet forestier ne pourra être considéré comme un puits de carbone que s'il remplit un certain nombre de conditions. En particulier, la définition du projet doit tenir compte d'une part d'une situation de référence qui correspond à un état hypothétique où le projet n'aurait pas eu lieu, et par rapport auquel le gain en carbone peut être calculé, et d'autre part des éventuels effets induits par le projet. Cette dernière condition permet de vérifier que le projet n'a pas créé par ailleurs une nouvelle source d'émissions de carbone du fait de transfert d'activités par exemple. Enfin, l'éligibilité par rapport aux critères du protocole de Kyoto impose que ce type de projet soit réalisé dans un des pays dits « non annexe 1 » et que l'accroissement de surface boisée soit effectif par rapport à l'année de référence fixée à 1990.

Les principales différences avec la méthode d'analyse du cycle de vie, en-dehors du fait qu'un seul impact est étudié, résident d'une part dans le fait que l'évaluation n'est pas limitée à une seule unité fonctionnelle, ce qui permet de s'affranchir des problèmes d'agrégation décrits précédemment, et d'autre part dans la prise en compte dans la problématique de différentes échelles de temps et d'espace.

De plus, comme il l'a été souligné précédemment, la réflexion menée ici s'étend sur plusieurs fonctions attribuées aux écosystèmes forestiers. Il ne s'agit pas d'une unité « multi-fonctionnelle » au sens qui pourrait être utilisé dans le cadre d'une analyse du cycle de vie classique, mais bien de différentes configurations, distinctes tout en ayant chacune un rôle significatif dans la perspective de stockage de carbone.

Il ne s'agit donc pas de préconiser un seul type d'action mais plutôt d'évaluer les différentes possibilités, qui pourront être mises en œuvre conjointement en fonction des conditions technico-économiques de terrain. Il ne s'agit pas non plus d'optimiser à l'échelle globale l'utilisation des biomasses forestières pour le stockage du carbone, dans la mesure où les contraintes entrant en jeu sont vastes et nombreuses.

3.6 Éléments pour une conclusion

Compte tenu du statut particulier de chapitre, essentiellement méthodologique, peu d'indications quantitatives sont à retenir.

Au niveau des réflexions globales, et encore bien davantage pour un projet, il est essentiel de prendre en compte toutes les dimensions, physiques et sociétales, des forêts : les trois dimensions sur lesquelles ce travail est particulièrement centré bien sûr, c'est-à-dire stockage de carbone, production de bois matériau et énergie, mais aussi les fonctions environnementales (actions sur le sol et sur l'eau), les fonctions d'aménagement et les services environnementaux. La méthodologie, ou démarche générale, qui a été retenue pour les études de cas suivantes est une adaptation de l'analyse du cycle de vie. Si cette méthode est parfaitement adaptée quand une fonction est clairement identifiée pour le système étudié, elle est cependant parfois restrictive dans le cas en particulier où plusieurs fonctions interviennent simultanément, à différentes échelles et pour des phénomènes dont la dynamique varie au cours du temps. Comme il l'a été déjà précisé auparavant, le travail est polarisé sur trois dimensions :

- Stockage de carbone,
- Production de bois matériau,
- Production de bois énergie.

Ce travail s'appuie sur 7 études de cas, présentées dans les trois chapitres suivants, chacune d'entre elles étant caractéristique d'une dimension principalement, l'ensemble des études de cas couvrant les trois dimensions retenues. Bien sûr, du fait de la multifonctionnalité du système, ces trois fonctions sont souvent liées et apparaissent de manière plus ou moins importante dans chacune des études de cas.



L'épicéa (*Picea excelsa* – *P. abies*) couvre en France une surface de 0,6 Mha.

4. APPLICATION DE LA DÉMARCHE AU SEUL STOCKAGE DU CARBONE DANS LES FORÊTS

4.1. LE SYSTÈME ET LES CAS ÉTUDIÉS (I ET II)

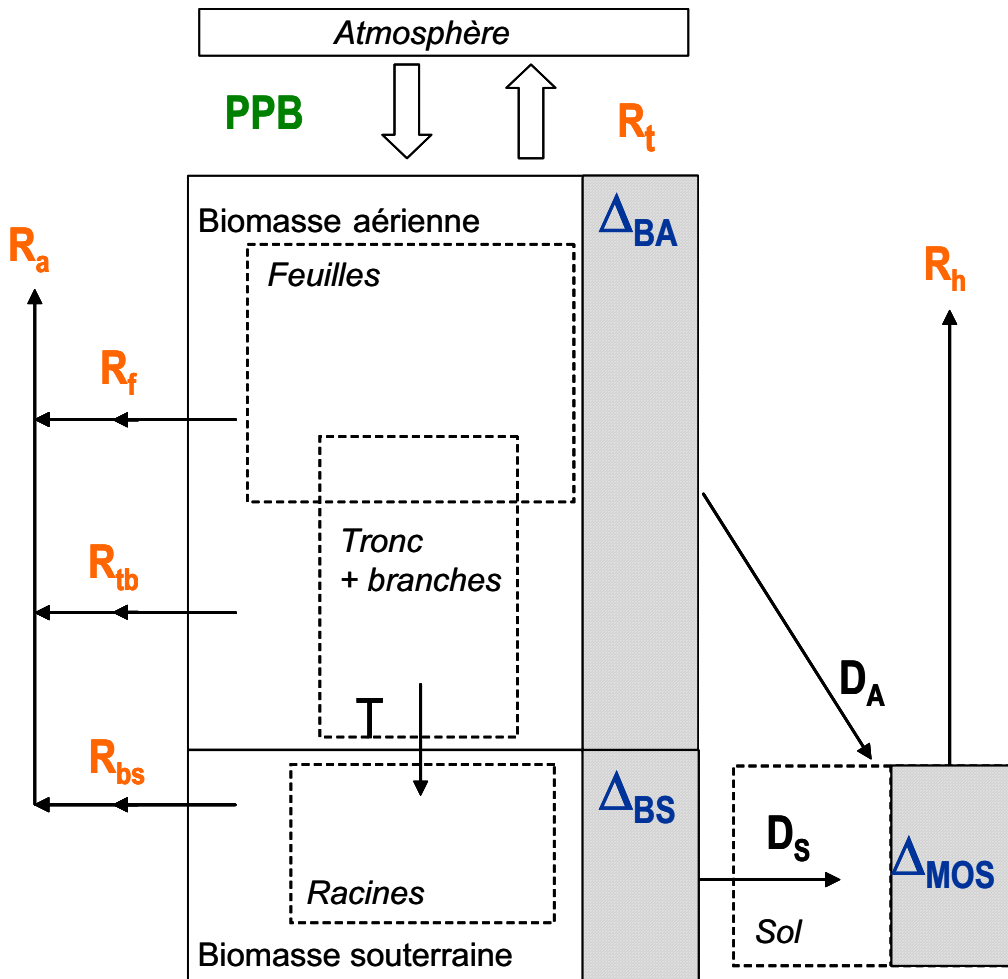
4.1.1. Modes de stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers

Les écosystèmes forestiers représentent un stock important de carbone, à la fois dans la biomasse aérienne et souterraine qu'ils rassemblent, et dans la matière organique morte présente dans les sols. La photosynthèse et l'assimilation du dioxyde de carbone atmosphérique permettent à une forêt en croissance d'absorber du carbone et de l'accumuler par l'accroissement de cette biomasse et de cette matière organique dans les sols (accroissement de déchets organiques). Le rôle des forêts dans la régulation du cycle du carbone à l'échelle globale est donc important et les écosystèmes forestiers peuvent représenter des puits de carbone intéressants, dans la mesure où l'utilisation de la biomasse est la seule voie qui permette actuellement, en dehors de la contribution éventuelle des océans, d'extraire du carbone de l'atmosphère pour le stocker, même provisoirement.

Les stratégies de gestion du carbone dans les écosystèmes sont de trois grands types : conservation des stocks existants, accroissement du stock sur pied ou établissement de nouvelles surfaces de forêt. Le stockage biologique de carbone dans les écosystèmes forestiers doit donc prendre en compte deux compartiments distincts : l'écosystème lui-même, où se fait la capture du carbone, et la filière bois éventuelle, dans le cas où l'écosystème est exploité, même partiellement, et où une partie du carbone fixé en amont lors de la photosynthèse est transféré vers les produits du bois. Il y a lieu de noter enfin que même lorsque le seul stockage de carbone est considéré, la recherche d'une bonne efficacité implique un questionnement sur les pratiques sylvicoles possibles et sur le devenir des éventuels déchets.

a) Conservation des stocks existants

Une part importante des émissions de carbone sous forme de CO₂ dans l'atmosphère est due à la déforestation ou plus généralement aux incendies de forêts, qu'ils soient naturels ou liés à l'activité anthropique : elle s'élève à un peu plus de 2 Gt C/an, soit plus du cinquième des émissions anthropiques de carbone. La conservation des forêts, ayant donc pour but de limiter, voire d'empêcher, les émissions de carbone déjà fixé dans les stocks existants, peut consister à protéger les forêts contre les incendies, les catastrophes naturelles ou la déforestation, ou bien encore se traduire par des pratiques d'exploitation améliorées, comme l'exploitation à impact limité, qui permettent de limiter les émissions en provenance du sol du fait de la décomposition des déchets d'exploitation. Si le déboisement était totalement annulé, la quantité de carbone conservée chaque année pourrait s'élever à une valeur comprise entre 1,2 et 2,2 Gt C/an [Dixon *et al.*, 1993].



- | | |
|------------------------|---|
| PPB | Production Primaire Brute |
| R_t | Respiration totale de l'écosystème |
| R_a | Respiration autotrophe |
| R_f | Respiration du feuillage |
| R_{tb} | Respiration de l'ensemble
tronc+branches |
| R_{bs} | Respiration des racines |
| R_h | Respiration hétérotrophe |
| Δ_{BA} | Accroissement de biomasse aérienne |
| Δ_{BS} | Accroissement de biomasse
souterraine |
| Δ_{MOS} | Accroissement de biomasse
organique du sol |
| T | Translocation |
| D_A | Déchets aériens |
| D_S | Déchets souterrains |

Figure 4. 1 - Schéma de principe du stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers : flux et accumulation de carbone.

Le potentiel des techniques d'exploitation à impact limité est lui aussi important, dans la mesure où dans les zones tropicales, jusqu'à 50 % des arbres laissés sur place sont blessés ou meurent [Kurpick *et al.*, 1997] : les pratiques de récolte améliorées pourraient permettre de réduire de 50 % ces déchets [Sist *et al.*, 1998]. D'autres estimations [Nabuurs et Mohren, 1993] suggèrent que pour les forêts tropicales exploitées, il peut exister des différences sur la quantité de carbone stockée par hectare, estimées à environ 85 tC/ha (73 à 97), entre des pratiques contrôlées ou améliorées, et des pratiques peu attentives.

Ces méthodes de conservation ne constituent pas en elles-mêmes des méthodes de stockage de carbone, mais leur impact global sur le cycle du carbone et sur l'intensification de l'effet de serre peut s'avérer significatif. Dans la mesure où c'est dans les toutes premières années suivant le défrichage que la majeure partie des émissions de carbone dues à la déforestation se produisent, l'effet d'une limitation du déboisement est plus immédiat que celui du stockage d'une même quantité de carbone par reboisement, qui se manifeste à plus long terme.

b) Accroissement du stock sur pied

En ce qui concerne les stocks sur pied, il est possible d'agir sur les quantités de carbone échangées entre l'écosystème et l'atmosphère par la gestion forestière. La mise en exploitation des forêts naturelles arrivées à maturité permet en effet de diminuer les pertes respiratoires et donc d'accroître les flux de carbone captés (Figure 4. 1). En particulier, les éclaircies pratiquées sur certains peuplements peuvent accroître significativement la productivité des écosystèmes. Même si par rapport à des actions de boisement ou de reboisement, le gain en carbone par des changements de gestion sylvicole est de moindre ampleur [Dixon *et al.*, 1993], cette démarche reste importante compte tenu des surfaces significatives concernées.

c) Constitution de nouveaux stocks

L'établissement d'une nouvelle forêt sur des surfaces non utilisées ou sur d'anciennes terres agricoles augmente la biomasse de l'écosystème et donc l'accumulation de carbone capté de l'atmosphère. À la maturité de la forêt, l'équilibre se fait entre les divers échanges de carbone avec l'atmosphère, la production primaire nette, PPN, (Figure 4. 1) et la décomposition se compensent et l'accroissement annuel de biomasse (et donc de carbone) accumulée dans l'écosystème diminue avec l'âge (voir par exemple l'évolution des courbes de Richards décrites dans le chapitre 2).

Un accroissement du stockage de carbone peut donc être envisagé par des changements d'allocation des sols. Le passage d'un écosystème de type pâturage ou culture vivrière à une forêt permet à coup sûr de piéger plus de carbone (Tableau 2.4). A l'échelle globale, la mise en oeuvre de cette remarque peut apparaître contradictoire avec l'extension nécessaire des surfaces cultivées pour l'alimentation humaine.

Par ailleurs, la masse de carbone en place dans les forêts déjà existantes est suffisamment importante pour que se pose encore une fois la question de l'influence de la gestion forestière sur le stockage du carbone par la diminution de la respiration qu'elle induirait (Figure 4. 1).

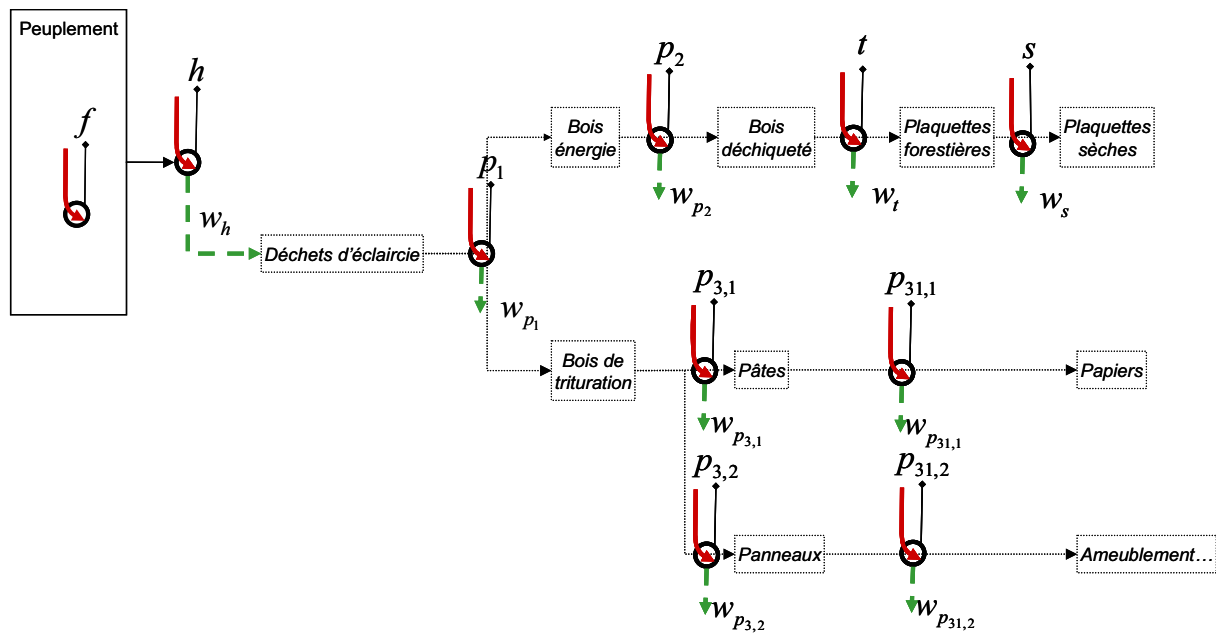


Figure 4. 2 - Schéma opérationnel de l'utilisation des forêts pour le seul stockage de carbone (Cas I et II) : détail des opérations possibles avec ou sans les éclaircies et les différentes utilisations du bois d'éclaircies.

La seule opération commune aux deux cas est la phase de sylviculture et plantation (f), comprenant la pépinière et la plantation des nouveaux peuplements.

Dans le cas II, où des éclaircies sont pratiquées, les opérations de récolte (h), de débardage et de transport (p_1) sont communes à toutes les utilisations.

Dans le cas où le bois est utilisé pour l'énergie, une opération de déchetage (p_2) précède le transport jusqu'au lieu d'utilisation (t) et le séchage (s).

Dans le cas où le bois est utilisé pour la trituration, une phase de première transformation, en pâte ou en panneaux ($p_{3,1}$ et $p_{3,2}$), précède la transformation finale en papier ($p_{31,1}$) ou dans l'ameublement ou la construction ($p_{31,2}$). Ces deux dernières opérations incluent une phase de transport du produit fini.

4.1.2. Les deux cas étudiés (cas I, cas II)

Dans le présent chapitre, l'accent est principalement mis sur la constitution de nouveaux stocks de carbone en forêt et sur la gestion des stocks existants (paragraphe 4.1.1 b et c). Pour faciliter les comparaisons, les grandeurs sont ramenées à un hectare de forêt. Sont donc développés dans la suite de ce chapitre :

- le cas noté I, qui correspond à un peuplement établi sur une surface non initialement boisée en vue d'un stockage de carbone sur pied,
- le cas noté II, qui correspond à la mise en œuvre de quelques actions complémentaires, destinées à améliorer le stockage de carbone sur pied, par exemple par des éclaircies régulières.

a) Usages antérieurs des surfaces

Les exemples traités ici sont relatifs à des boisements sur des terrains non initialement boisés. Par ailleurs, le système de seul stockage dans les forêts suppose qu'il n'y a pas d'exploitation du bois, donc pas d'exportation de carbone en-dehors du système biologique. L'écosystème est donc en croissance libre. Dans ce cas, le système tend vers un état d'équilibre hypothétique, au bout d'un temps plus ou moins long, dépendant des conditions pédo-climatiques et des éventuelles perturbations. Dans la pratique, cet état n'est jamais réellement atteint, du fait justement des nombreuses perturbations, comme notamment les catastrophes naturelles (tempêtes...) ou les incendies de forêts.

Le système se décompose en plusieurs sous-compartiments : la biomasse, aérienne (tronc, branches et feuilles) et souterraine (racines), et le sol. Le stockage de carbone se fera donc par l'augmentation de la quantité de carbone contenue dans chacun des sous-compartiments identifiés.

La Figure 4. 2 présente le schéma opérationnel de l'utilisation des forêts pour le seul stockage de carbone, lorsqu'il s'agit de l'établissement de forêts sur des terrains non boisés initialement, c'est-à-dire soit des terres agricoles abandonnées, soit des prairies, soit des terres marginales. Il s'agit donc d'étudier le potentiel de constitution de nouveaux stocks, en évaluant le gain par rapport à une surface agricole ou à une prairie. Dans un premier temps, un bilan sera fait indépendamment du scénario de référence, sur une parcelle boisée.

b) Entretien et gestion des forêts

Dans le cas du seul stockage de carbone (cas I), le système global se confond avec le système de production de biomasse, c'est-à-dire l'écosystème forestier, dans la mesure où il n'y a pas production de bois. Cependant, il est possible d'envisager une filière aval dans le cas où soit des éclaircies soit des élagages sont pratiqués et où le bois d'éclaircies est valorisé soit sous forme d'énergie, soit sous forme de bois de trituration (cas II). La prise en compte des éclaircies est faite pour évaluer la sensibilité du système de seul stockage aux pratiques visant à améliorer le stockage sur pied.

L'effet des éclaircies sur le stockage sur pied peut être modélisé au travers de ses conséquences sur la mortalité et la respiration hétérotrophe de l'écosystème. Les éclaircies diminuent la mortalité absolue du peuplement en transférant une partie du bois vers les produits. De ce fait, la quantité de biomasse dans la litière diminue de même que la quantité de carbone émise par respiration hétérotrophe, proportionnelle à la quantité de carbone dans le sol [Gitz et Ciais, 2003]. La production primaire nette n'étant pas modifiée, le stockage net dans l'écosystème augmente.

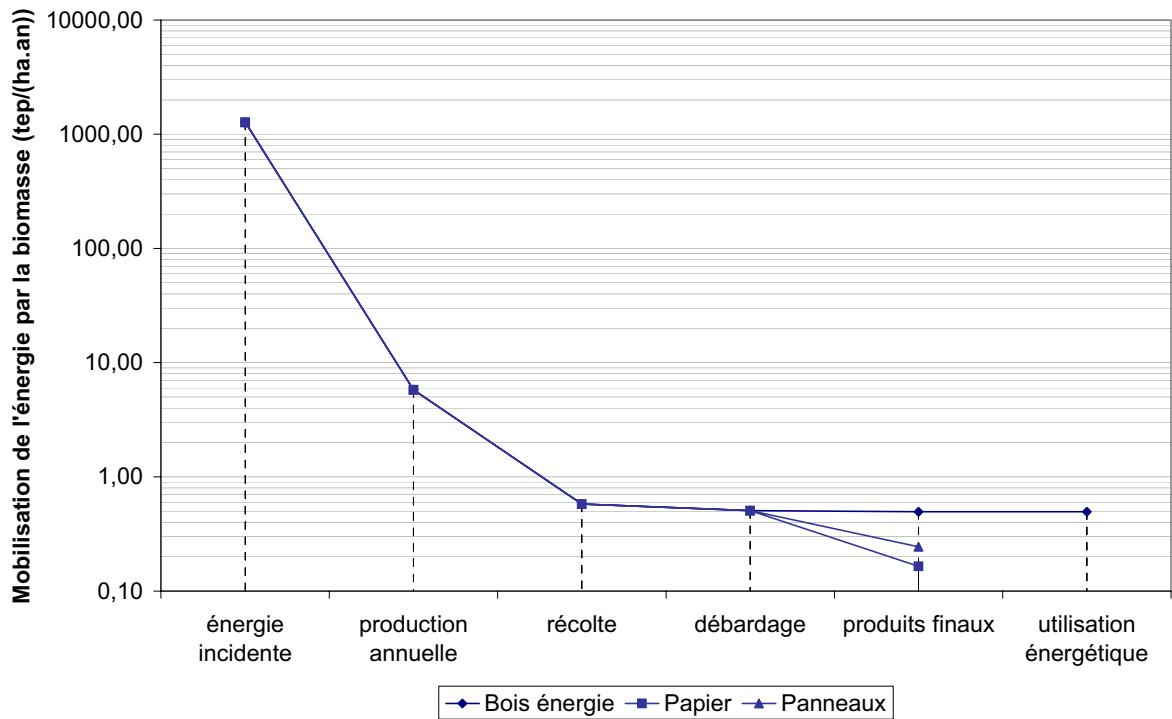


Figure 4. 3 - Mobilisation d'énergie dans la biomasse au fil des étapes de transformation.

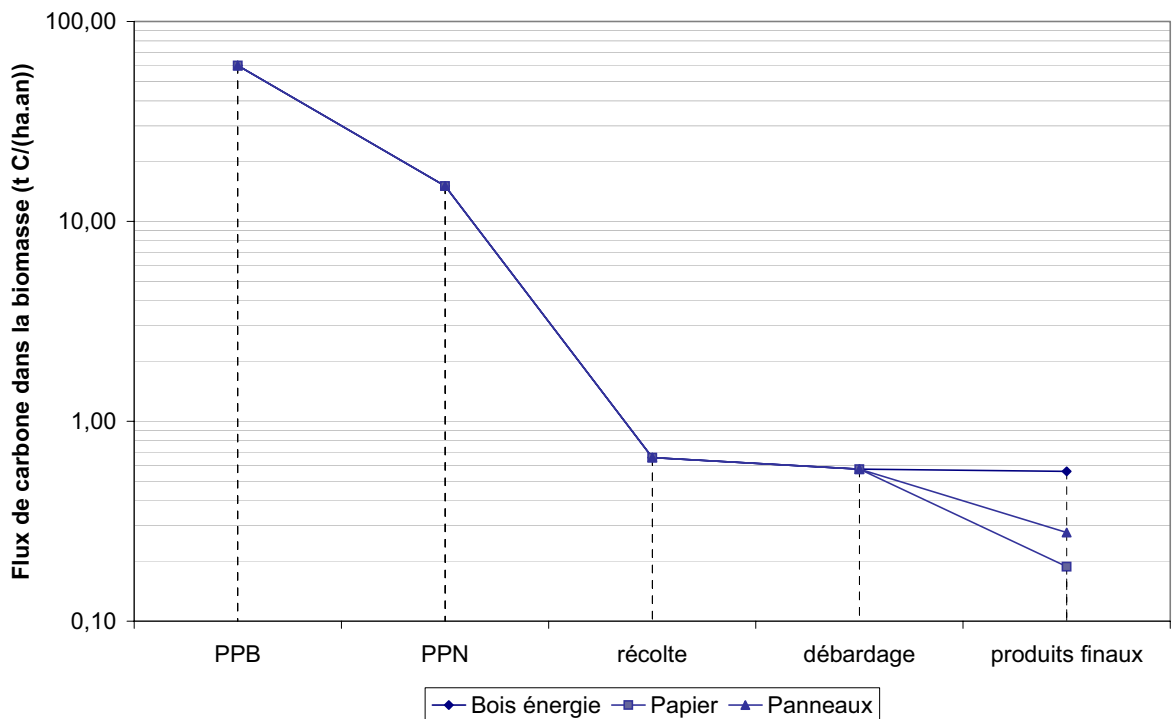


Figure 4. 4 - Flux de carbone dans la biomasse au fil des transformations.

Mais dans le cas où une intervention humaine a lieu, comme lorsqu'il y a des éclaircies, il convient de tenir compte de toutes les émissions de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles lors des différentes opérations, et tout au long de la transformation et de l'utilisation du bois éventuellement récolté après les éclaircies (Figure 4. 2).

Il est supposé que le bois d'éclaircie est utilisé soit pour la production de bois énergie, soit pour la production de bois de trituration pour la fabrication, soit de panneaux, soit de papier ou carton. Chaque utilisation sera considérée indépendamment des deux autres, c'est-à-dire que tout le bois d'éclaircie sera supposé être utilisé pour un seul type de produit.

4.2. FLUX ET BILANS

4.2.1. Flux d'énergie

Deux types de flux sont considérés :

- les flux d'énergie liés à l'activité de la biomasse,
- les autres flux, qualifiés de flux d'énergie externe.

a) Flux d'énergie liés à l'activité de la biomasse

Pour réaliser un bilan complet des flux d'énergie dans le système de stockage biologique de carbone dans les écosystèmes forestiers, il convient de tenir compte de tous les types d'énergie utilisée, y compris donc l'énergie solaire et sa conversion par les écosystèmes forestiers.

La conversion de l'énergie solaire par les végétaux se fait par des processus à rendement très faible, notamment la photosynthèse. Le système considéré ici correspond aux arbres eux-mêmes, les végétaux couvrant le sol n'étant pas pris en compte. Sur la totalité du flux d'énergie solaire incidente atteignant les forêts, une partie est réémise par rayonnement (effet de l'albédo), et une partie est utilisée lors de la respiration des arbres. Par ailleurs, du fait de certains facteurs limitants, ainsi que de la durée de la saison de croissance, une partie du rayonnement annuel est perdue. Finalement, l'énergie absorbée par les arbres lors de leur croissance, dans des gammes très précises de longueurs d'ondes, ne représente qu'une faible proportion de l'énergie incidente.

L'énergie absorbée par les arbres est dégradée au fil du temps du fait de la mortalité (cas I), ou exportée éventuellement hors de la forêt, dans le cas où l'entretien des forêts comprend des éclaircies sur la parcelle (cas II). Lorsqu'une part de l'énergie accumulée dans le bois sur pied est exportée lors des éclaircies, elle peut être valorisée directement sous forme de bois énergie ou indirectement sous forme de bois de trituration. La part de la biomasse aérienne exportée durant les éclaircies est d'environ 10 %. Une estimation de l'évolution du contenu énergétique du bois peut être faite, d'après la grille de lecture proposée par Bonnet [Bonnet, 1998]. L'énergie annuelle incidente sur un hectare de forêt vaut, en moyenne sur la surface du globe, 50400 GJ/an, soit 1200 tep/an. Sur cette énergie incidente, seule une partie est matérialisée dans la biomasse lors de la synthèse organique, dont le rendement est en moyenne de 0,45 %. Enfin, dans le cas où une partie de cette biomasse est exportée de la parcelle, le contenu énergétique qu'elle représente peut être approché par son pouvoir calorifique inférieur (PCI). Les flux d'énergie mobilisée par la biomasse sont représentés Figure 4. 3.

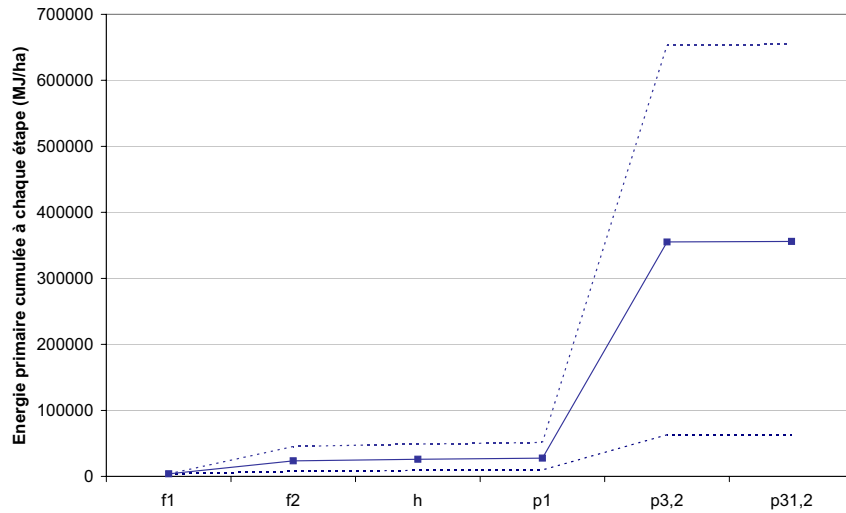


Figure 4. 5 - Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la fabrication de panneaux.

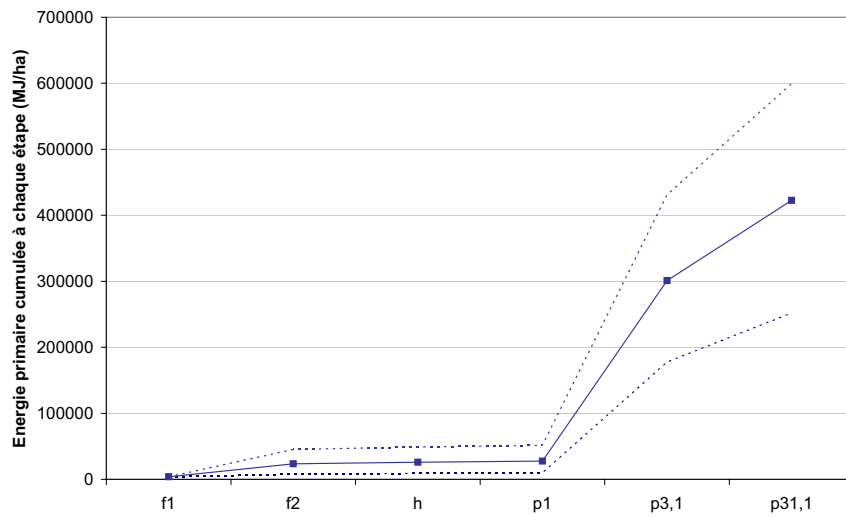


Figure 4. 6 - Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la fabrication de papier et carton.

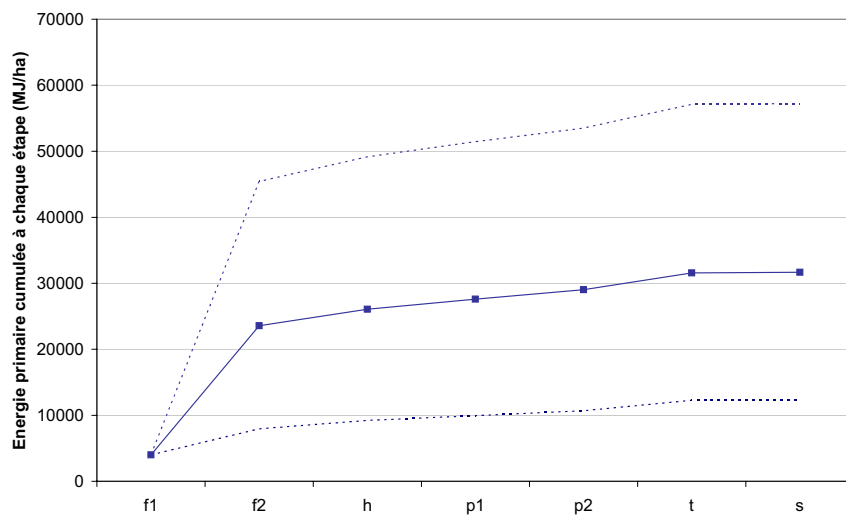


Figure 4. 7 - Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la production de bois énergie.

b) Flux d'énergie externe

Les flux d'énergie externe, indissociables de toute activité de gestion d'un peuplement forestier (carburant, séchage de produits...) sont de deux catégories : les flux d'énergie renouvelable, comme notamment le bois énergie, et les flux d'énergie non renouvelable, essentiellement l'énergie fossile.

Dans le cas du seul stockage du carbone (cas I), les flux d'énergie fossile sont liés à la plantation et à l'entretien des surfaces boisées composant le système. Cet apport d'énergie est mis en oeuvre sous forme de carburant, principalement dans les engins ou machines de transformation, ou encore sous forme de produits d'un certain contenu énergétique mais utilisés pour des usages non énergétiques, comme c'est le cas pour les différentes huiles de lubrification, ou pour les engrais le cas échéant. S'il n'y a pas d'intervention d'entretien sur la surface de forêt après la plantation, les seuls flux d'énergie fossile correspondent donc à ce qui a été dépensé pour la plantation.

Sur toute la durée de vie du peuplement, ces flux d'énergies sont très faibles, et concentrés principalement sur le début de la vie du peuplement. C'est ce qui peut être constaté sur les figures 4.5 à 4.7 : sur ces figures, les seules opérations à prendre en compte dans le cas I sont les opérations notées f_1 et f_2 , respectivement pour la pépinière et la plantation du peuplement.

Lors de la phase de sylviculture, l'énergie intervient plus précisément pour les usages suivants :

- production des plants en pépinière [ADEME/DERF, 1998],
- préparation du sol (brûlage des rémanents, dessouchage le cas échéant...) [ADEME/DERF, 1998],
- consommation primaire d'énergie pour la production de carburant, d'engrais et de phytosanitaires [Elsayed et al., 2003].

Des consommations d'énergie doivent bien sûr également être prises en compte pour les phases d'éclaircies ainsi que pour les différents stades de transformation du bois issu de ces coupes d'éclaircie (cas II) : déchetage, trituration, séchage, mise en forme et utilisation de résine... [Bucket, 2004, Elsayed et al., 2003, CTBA, 1998, Frühwald et al., 1997]. Les consommations spécifiques d'énergie sont consignées dans le Tableau 4. 1.

4.2.2. Flux de carbone

De même que pour l'énergie, deux types de flux de carbone sont recensés :

- les flux de carbone issus de la biomasse,
- les flux de carbone externes, liés à la consommation d'énergie externe.

a) Flux de carbone issus de la biomasse

Les principaux flux de carbone dans la biomasse sont : le flux de carbone capté de l'atmosphère vers la biomasse lors de la production de matière (la production primaire brute), le flux de carbone rejeté par respirations, autotrophe et hétérotrophe, le flux de carbone transféré de la biomasse au sol du fait de la mortalité (cas I et II), auxquels s'ajoute pour le cas II seulement les flux correspondant au bois récolté lors des éclaircies. Un bilan de tous ces flux donne la production nette de l'écosystème, accroissement net de carbone dans le système. Un récapitulatif des flux annuels de carbone dans la biomasse est proposé Figure 4. 4.

Tableau 4. 1 - Détail des consommations spécifiques d'énergie externe pour chacune des opérations identifiées, par type d'énergie finale utilisée et par unité de référence utilisée dans la littérature ou les sources statistiques.

Opération	Consommation spécifique d'énergie externe, e_i en MJ/U	Type d'énergie finale	Rendement matière, ε_i	Unité de référence, U
f_1	4002	Carburant : 14 % Phytosanitaires/engrais : 86 %	-	ha
f_2	[3955-41429]	Carburant : 100 %	[0,06-0,12]	ha
h	[48-62]	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[3,3-4,6]	m ³ bois récolté
p_1	[28-38]	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[0,8-0,95]	m ³ bois récolté
p_2	38	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[0,95-1]	t de plaquettes
$p_{3,1}$	25200	Électricité : 43 % Vapeur : 57 %	0,35	t de pâte
$p_{3,2}$	418	Électricité : 22 % Butane : 31 % Carburant : 2 % Résine : 45 %	0,66	m ² de panneaux
t	82	Carburant : 100 %	1	t de plaquettes
$p_{31,1}$	11880	Électricité : 55 % Carburant : 45 %	0,94	t de papier ou carton
$p_{31,2}$	[50-73]	Électricité : 69 à 87 %] Carburant : 13 à 29 % Huiles : 0 à 2 %	[0,6-0,85]	m ³ panneaux transformés
s	[0-6100]	Électricité : 0 à 100 % Chaleur (autre) : 0 à 75 %	1	t de bois séché

Tableau 4. 2 - Coefficients d'émissions de C primaire par type d'énergie finale utilisée.

	Coefficient d'émissions de C primaire g C/MJ	Incertitude	Loi de probabilité
Type d'énergie finale			
Carburant	24,85	5 %	Normale
Électricité			
<i>France</i>	9,84	10 %	Normale
<i>Europe</i>	41,45	10 %	Normale
Chaleur			
<i>Charbon</i>	39,95	5 %	Normale
<i>Pétrole</i>	28,92	5 %	Normale
<i>Gaz</i>	21,95	5 %	Normale
Type de produit à usage non énergétique			
Engrais	30,45	[17,95-42,95]	Uniforme
Huiles	4,07	[3,25-4,90]	Uniforme
Résines	10,18	50 %	Uniforme
Filets	12,89	50 %	Uniforme

Le bilan de carbone issu de la biomasse sur la période de référence considérée sera composé :

- du carbone accumulé dans l'écosystème sur pied au cours de la période d'observation considérée, à la fois dans la biomasse elle-même et dans le sol (cas I et II),
- du carbone accumulé dans les produits, lorsqu'une partie du bois est exporté lors des éclaircies (cas II).

b) Flux de carbone externes

Les flux de carbone externes proviennent de l'utilisation d'énergie externe, principalement des combustibles fossiles carbonés, utilisés pour la plantation et l'entretien des forêts, ainsi que pour la récolte et les différentes transformations du bois.

Les sources d'émissions de carbone sont les suivantes :

- Consommation d'énergie fossile : carburants, électricité, chaleur,
- Utilisation de matériaux à forte valeur énergétique ou dont la fabrication mobilise beaucoup d'énergie fossile : engrais, huiles hydrauliques, huiles lubrifiantes.

Pour chaque source, il convient de prendre en compte le taux d'émissions direct, c'est-à-dire lié à l'utilisation finale de la matière (combustion ou autre), et également le taux d'émissions lié à la fabrication du produit.

4.2.3. Bilans

a) Références choisies pour les bilans

Il s'agit ici, pour les deux cas étudiés, de comparer les bilans d'énergie et de carbone, en vue d'identifier les paramètres pertinents pour le stockage du carbone. Plusieurs régimes d'évolution sont à distinguer : un régime transitoire qui correspond à la période d'établissement du peuplement, et un régime établi, qui peut être soit pseudo-permanent lorsque la parcelle n'est pas entretenue, soit pseudo-périodique dans le cas où des éclaircies sont pratiquées à intervalles réguliers.

Les données inventoriées se rapportent à des flux d'énergie ou de carbone, qui évoluent au cours du temps. Il est donc nécessaire, pour évaluer dans chaque cas le stockage total, de définir une période de référence sur laquelle tous les flux seront accumulés pour comparer les différentes configurations. Deux périodes de référence seront retenues ici : la première correspond à la durée de la période transitoire dans le cas où la forêt n'est pas entretenue et la deuxième, dans le cas d'un régime pseudo-permanent, s'étend sur la durée qui sépare deux éclaircies consécutives.

Pour l'application numérique, les données relatives à une forêt moyenne en Europe occidentale ont été retenues. La durée du régime transitoire correspondant est alors définie comme la durée nécessaire à l'établissement du stock à 95 % de sa valeur en régime pseudo-permanent. Pour l'application à la forêt moyenne en Europe, elle s'élève à 74 ans.

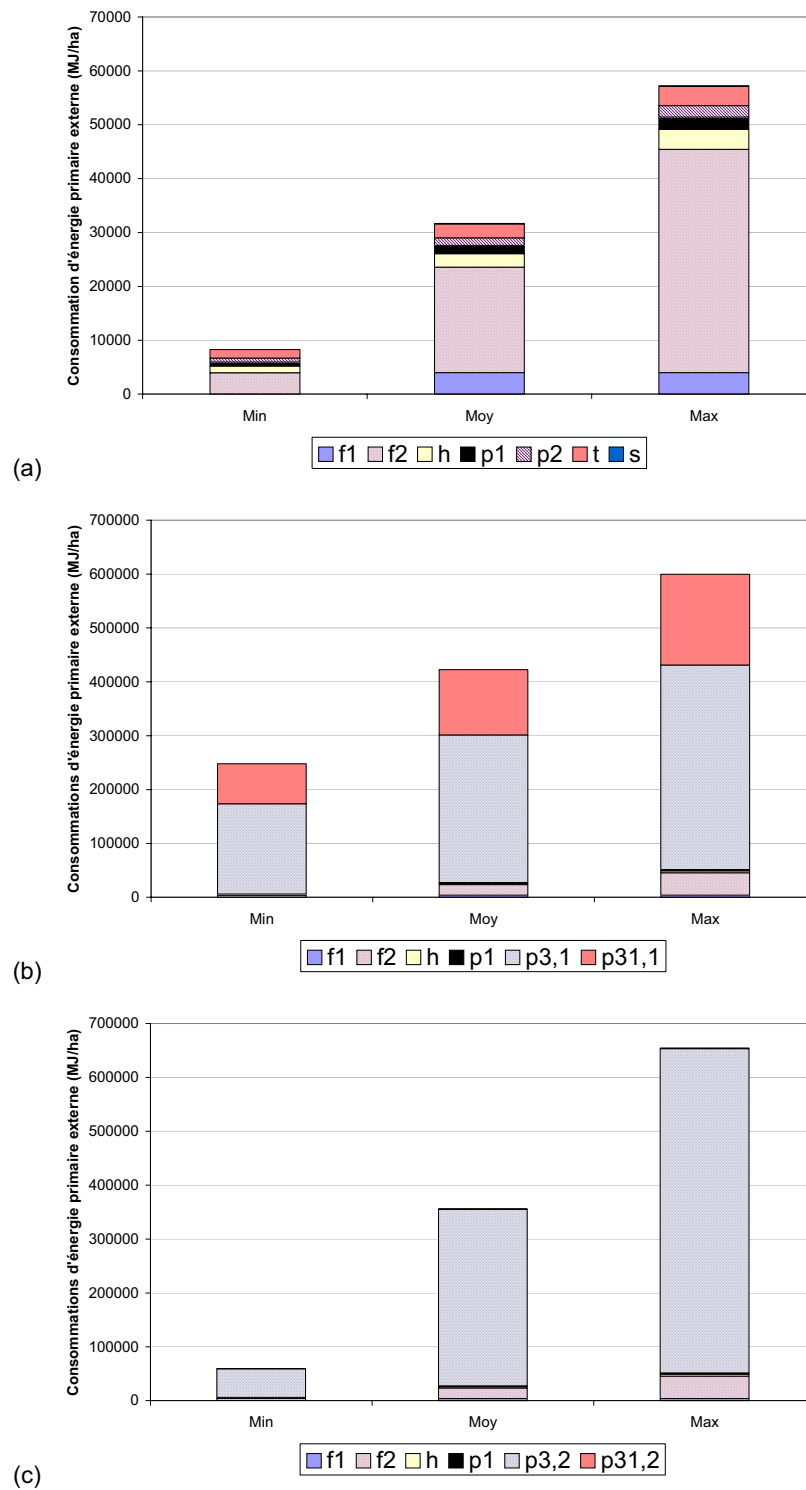


Figure 4. 8 - Répartition des consommations d'énergie primaire externe pour chacune des utilisations du bois d'éclaircies : bois énergie (a), fabrication de papier et carton (b) et fabrication de panneaux de bois (c). Chaque histogramme correspond à un scénario de consommations minimum (Min), moyen (Moy) ou maximum (Max). Les consommations d'énergie sont relatives à une parcelle entre l'établissement du peuplement et la première éclaircie.

Le temps de croissance avant la première éclaircie peut varier, en fonction des espèces et du mode de gestion retenu, entre 10 et 35 ans après l'établissement du peuplement. Les éclaircies suivantes, souvent moins espacées dans le temps, peuvent s'effectuer tous les 5 à 20 ans. Pour les calculs, ce sont des valeurs moyennes pour l'Europe Occidentale qui sont retenues, c'est-à-dire 20 ans pour la première éclaircie et 10 ans entre chaque éclaircie suivante.

b) Bilans d'énergie

À partir des coefficients spécifiques d'utilisation d'énergie externe (Tableau 4. 2) affectés à chacune des opérations identifiées (Tableau 4. 1), il est possible de dresser un bilan global des consommations d'énergie primaire externe (Équation 4.1).

$$E_{\text{fossile,totale}} = e_{r1} + e_{r2} + e_h + \dots \quad (4.1)$$

Dans le cas I, pour une situation limite de reboisement naturel, aucune source d'énergie externe puisqu'il n'y a pas d'éclaircies. Lorsqu'aucune éclaircie n'est effectuée, mais s'il ne s'agit pas d'un reboisement naturel, les seules consommations d'énergie externe correspondent à celles de la phase de sylviculture, comprenant la croissance en pépinière (f_1) et la plantation (f_2).

Les données concernant les consommations d'énergie pour la sylviculture peuvent varier significativement, notamment en fonction du scénario retenu pour l'utilisation d'engrais. Aussi, lorsque plusieurs configurations sont disponibles, des fourchettes sont données pour les consommations d'énergie relatives à chaque opération. Il en est ainsi des phases f_1 et f_2 en particulier : la valeur basse de la consommation d'énergie correspond à une sylviculture extensive, et la valeur haute à une sylviculture intensive avec utilisation d'engrais. En ce qui concerne la phase d'abattage, dans la mesure où la consommation d'énergie est directement proportionnelle à la quantité de bois récolté, le scénario bas correspond à une valeur basse de la quantité de bois récolté et le scénario haut, à une quantité importante de bois d'éclaircies. Enfin, dans le cas particulier du séchage, il est envisageable qu'aucune source externe d'énergie ne soit utilisée et que les plaquettes soient laissées à sécher à l'air libre.

Les consommations d'énergie peuvent varier significativement entre les scénarios (Figure 4. 8) : les valeurs minimales correspondent notamment au cas où la sylviculture se fait sans apport d'engrais et sans filets de protection, mais surtout correspondent à un volume d'éclaircies moindre, ce qui implique des consommations d'énergie plus faibles.

c) Bilans de carbone

Le bilan net de carbone doit comprendre aussi bien le carbone contenu dans le bois et l'écosystème que le carbone émis lors de la consommation d'énergie fossile. L'accroissement de stock de carbone dans la filière complète, c'est-à-dire le stockage de carbone à proprement parler, correspond à ce bilan net. Il convient de préciser la période de référence sur laquelle le bilan est fait : dans un premier temps, la durée considérée correspond à la période de croissance de l'écosystème jusqu'à la première éclaircie à laquelle il convient d'ajouter la durée de vie moyenne des éventuels produits récoltés.

De même que pour l'énergie, les émissions de carbone varient de façon importante entre les trois scénarios et pour une même utilisation du bois, entre les hypothèses faites sur la quantité de bois récoltée et sur le séchage éventuel des produits (Figure 4. 9).

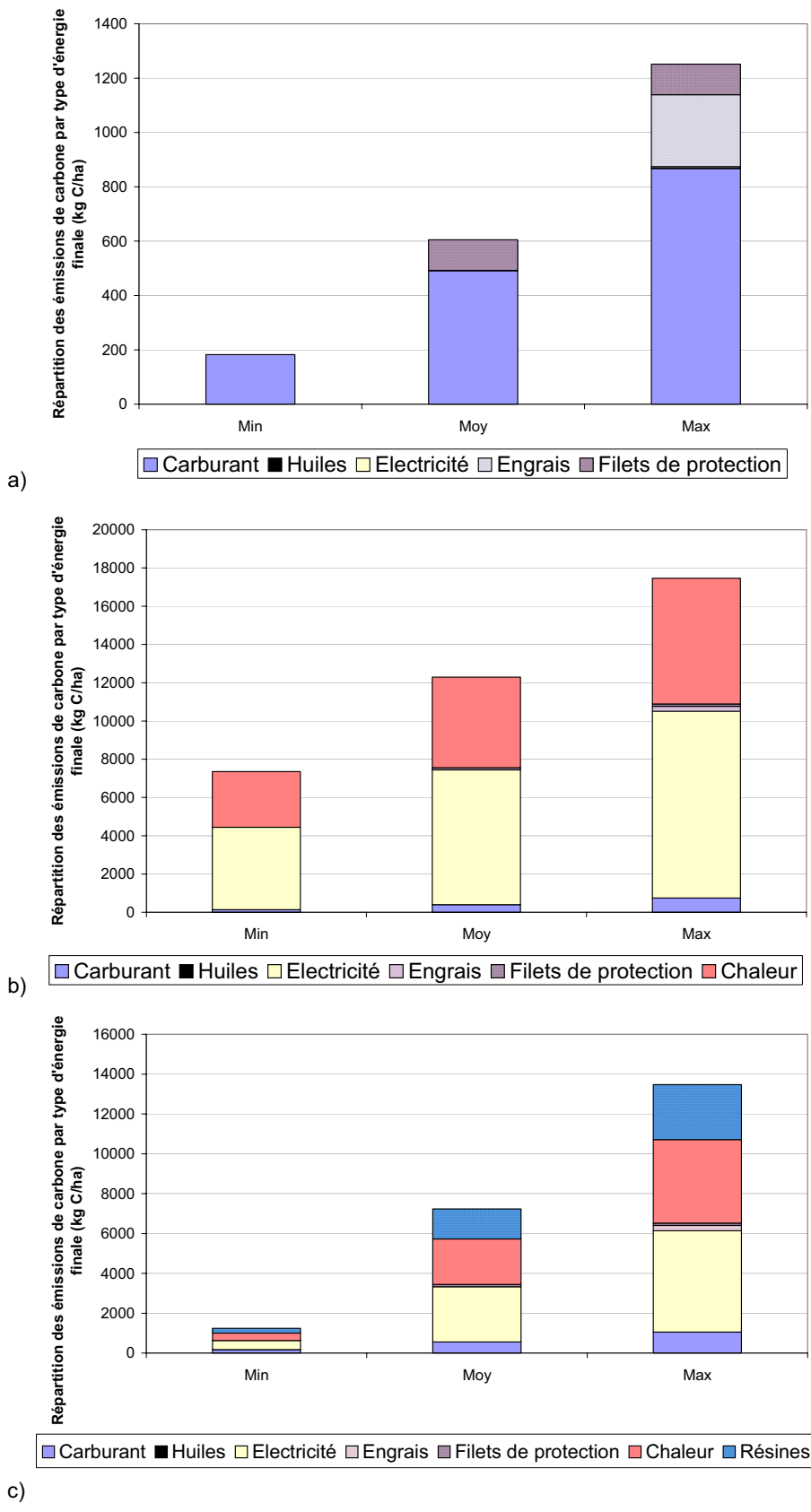


Figure 4. 9 - Répartition des émissions de carbone par type d'énergie primaire, dans le cas II, lorsque le bois d'éclaircie est utilisé pour l'énergie (a), le papier (b) ou la fabrication de panneaux (c).

4.3. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ ET CALCULS D'INCERTITUDES

Des études de sensibilité ont été faites sur les quelques aspects qui ont semblé les plus significatifs.

4.3.1. Horizon temporel

La notion de temps est primordiale dans la définition d'un projet de stockage de carbone. Elle correspond à la définition de plusieurs horizons : la durée prévue du projet, la durée d'observation du stockage, la période de référence considérée. La définition de ces durées joue un rôle primordial dans l'appréciation des projets : c'est en effet à partir d'elles que des conclusions sur les efficacités relatives de stockage pourront être tirées.

Plusieurs horizons temporels peuvent être pris en compte pour décrire le fonctionnement du seul stockage de carbone : par rapport au temps d'établissement du régime permanent (cas I et II), sont ainsi utiles le temps séparant la plantation de la première éclaircie ou la durée qui sépare deux éclaircies en régime pseudo-permanent (cas II).

Deux horizons temporels ont ainsi été privilégiés :

- le premier correspond à la durée du régime transitoire, défini comme le temps que met le système à atteindre 95 % du stock de carbone maximum, dans la configuration où aucune éclaircie n'est pratiquée (cas I et II),
- le deuxième s'étend, en régime pseudo-permanent, entre deux éclaircies (cas II).

Ces durées sont variables en fonction des peuplements et de leur localisation géographique. Elles permettent d'évaluer deux types d'action : soit l'établissement de nouvelles terres boisées, soit la mise en gestion de forêts non encore perturbées par l'Homme.

Les résultats pour une forêt moyenne en Europe occidentale montrent qu'en régime transitoire, le seul stockage, sans éclaircies, permet de stocker plus de carbone que si des éclaircies sont pratiquées, sauf dans le cas où la biomasse est valorisée sous forme d'énergie, avec un taux de substitution élevé, par exemple lors de la substitution à du charbon pour la production de chaleur (chapitre 6).

En régime pseudo-permanent, en revanche, dans la mesure où l'écosystème libre tend vers un état d'équilibre où il ne stocke pratiquement plus de carbone, c'est le régime d'éclaircies qui s'avère « stocker le plus de carbone », surtout lorsqu'il y a substitution énergétique ou substitution à des matériaux tels que l'acier par exemple dans le cas des panneaux de bois. Lorsqu'il n'y a pas de substitution, le bilan reste toujours en défaveur de la production de bois, et c'est le cas pour la production de papier ou celle de panneaux non substitués à d'autres matériaux. Ceci s'explique par le fait que dans ces cas, la consommation d'énergie, relativement importante, est source de plus d'émissions de carbone qu'il n'en est capté par la croissance des peuplements.

4.3.2. Conditions pédo-climatiques

Le stockage de carbone, à l'échelle locale, dépend bien sûr des espèces présentes dans le peuplement. Cependant, à l'échelle globale, dans la mesure où les contraintes pédo-climatiques deviennent importantes, le type d'espèce planté a une influence moindre sur le résultat final.

Tableau 4. 3 - Variation du stockage de carbone en fonction des conditions pédo-climatiques (cas I).

Région	PPN tC/(ha.an)	Mortalité % de PPN	Respiration % de C du sol	Régime transitoire	
				Durée	C accumulé
				années	tC/ha
Canada	4,6	0,09	0,02	143	266
États-Unis	5,9	0,07	0,04	75	220
Amérique centrale	10,0	0,06	0,05	59	348
Amérique du Sud	10,0	0,06	0,05	59	348
Afrique	10,0	0,06	0,05	59	348
Europe occidentale	5,9	0,07	0,04	74	220
Europe de l'Est	4,5	0,11	0,02	146	252
Ex-URSS	2,8	0,15	0,06	46	62
Moyen Orient	10,0	0,06	0,05	59	348
Asie du Sud	8,8	0,06	0,04	71	348
Asie de l'Est	6,7	0,06	0,05	70	233
Asie du Sud Est et Japon	8,8	0,06	0,04	71	348
Océanie	8,8	0,13	0,15	26	120

Tableau 4. 4 - Variation du stockage de carbone en fonction des conditions pédo-climatiques (cas II).

Région	Régime transitoire			Régime pseudo-permanent		
	Durée années	C accumulé dans le peuplement		Durée années	C accumulé dans le peuplement	
		Sans éclaircies	Avec éclaircies		Sans éclaircies	Avec éclaircies
		tC/ha	tC/ha		tC/ha	tC/ha
Canada	143	266	265	20	0-0,5	1,5-4
États-Unis	75	220	219	10	0-0,5	1-2
Amérique centrale	59	348	345	7	0-0,5	1-2
Amérique du Sud	59	348	345	7	0-0,5	1-2
Afrique	59	348	345	7	0-0,5	1-2
Europe occidentale	74	220	219	10	0-0,5	0,6-1
Europe de l'Est	83	348	347	15	0-0,5	1-1,5
Ex-URSS	46	62	62	20	0-0,5	0,5-1,5
Moyen Orient	59	348	345	7	0-0,5	1-2
Asie du Sud	71	348	345	7	0-0,5	1-2,5
Asie de l'Est	70	233	232	10	0-0,5	1-2
Asie du Sud Est et Japon	71	348	345	7	0-0,5	1-2,5
Océanie	26	120	120	10	0-0,5	1-2

L'influence des espèces sur le seul stockage de carbone intervient essentiellement dans le stockage sur pied, et beaucoup moins dans les coefficients spécifiques de consommation d'énergie ou d'émission de carbone. Sur ces derniers, la différence entre les espèces provient du fait que suivant l'espèce plantée, le recours aux engrais est plus ou moins important, suivant l'intensité de la culture. Ainsi, dans une plantation de peuplier, les consommations d'énergie, et donc les émissions de carbone, sont souvent plus importantes du fait de l'utilisation d'engrais et de phytosanitaires.

L'espèce a également une influence indirecte sur les consommations d'énergie, puisque la quantité de bois d'éclaircie récolté est différente d'une espèce à une autre.

La vitesse de croissance et le stock maximal varient quant à eux aussi d'une espèce à une autre, et constituent là un facteur de sensibilité important du bilan global, puisqu'elle modifie la durée du régime transitoire.

a) Influence des conditions pédo-climatiques sur un système libre (cas I)

Les conditions pédo-climatiques influencent à la fois les espèces présentes dans le peuplement et les dynamiques de croissance du stock de carbone. Il a été choisi ici de modéliser ces variations en faisant varier les paramètres principaux que sont la production primaire nette, la mortalité et le taux de respiration pour différentes régions du monde (Tableau 4. 3).

Les résultats de l'étude de sensibilité sont consignés dans le Tableau 4. 3. L'accumulation de carbone par hectare sur la durée du régime transitoire varie significativement d'un biome à un autre, sous l'effet des trois paramètres que sont, la production primaire nette, la mortalité et le taux de respiration. La durée d'observation calée sur le régime transitoire varie également de façon importante d'un type de végétation à l'autre, de fait des vitesses de croissance variables.

b) Influence des conditions pédo-climatiques sur un système entretenu (cas II)

Du fait de la variation du stock sur pied, la quantité de bois exportée lors des éclaircies varie en fonction des biomes, sous l'effet des conditions pédo-climatiques et des espèces en présence dans le peuplement.

Les mêmes variations des paramètres ont été retenues pour étudier l'influence de ces conditions lorsqu'il y a des éclaircies à intervalles réguliers sur le peuplement.

Les résultats de l'étude de sensibilité sont consignés dans le Tableau 4. 4. L'influence du type de végétation est sensible sur le stock de carbone constitué dans l'écosystème, de la même façon que dans le cas où il n'y a pas d'éclaircies. Elle est également sensible sur les émissions de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles, dans la mesure où la quantité de bois exportée et transformée varie entre les différents biomes. Sur la période d'observation correspondant au régime transitoire, les variations sont sensiblement les mêmes que dans le cas I. Dans le cas du régime pseudo-permanent, pour les biomes les plus productifs, le carbone accumulé peut atteindre 2 tC/ha.

Tableau 4. 5 - Récapitulatif des indicateurs de stockage de carbone pour chaque configuration.

Intitulé	Unité	Régime transitoire		Régime pseudo-permanent	
		Sans éclaircies	Avec éclaircies	Sans éclaircies	Avec éclaircies
$E_{fossile, total}$	MJ/ha	[7960-45430]	Énergie : [30520-638890] Panneaux : [273830-1319900] Papier : [1197110-1198410]	0	Énergie : [4000-103710] Panneaux : [48450-233520] Papier : [211800-212030]
$\Gamma_{fossile, total}$	kg C/ha	[220-1150]	Énergie : [716-25600] Panneaux : [16600-23050] Papier : [20265-47240]	0	Énergie : [90-2230] Panneaux : [485-3875] Papier : [3550-8155]
$\Gamma_{biomasse, total}$	kg C/ha	220000	219000	[0-500]	[600-1000]
$\Gamma_{substitution, total}$	kg C/ha	0	Énergie : [14330-71630] Panneaux : [0-600] Papier : 0	0	Énergie : [2535-12675] Panneaux : [0-100] Papier : 0
$\Gamma_{produits, total}$	kg C/ha	0	Énergie : 0 Panneaux : 10110 Papier : 0	0	Énergie : 0 Panneaux : 1790 Papier : 0
$\Gamma_{stocké, total}$	kg C/ha	[218850-219780]	Énergie : [207730-289914] Panneaux : [159950-203000] Papier : [171760-198735]	[0-500]	Énergie : [905-13585] Panneaux : [-3275-615] Papier : [-7555--2550]

4.3.3. Influence des éclaircies (cas I vs cas II)

Les éclaircies sont généralement réalisées mécaniquement, d'où une consommation d'énergie importante par mètre cube de bois récolté. Parallèlement, les éclaircies ont un effet bénéfique sur la croissance des forêts, puisqu'elles favorisent sa productivité : la quantité de bois exporté diminue la mortalité et par conséquent améliore le stockage de carbone dans l'écosystème sur pied. Ainsi, l'écosystème continue de stocker sur une période plus longue que dans le cas où aucune intervention humaine n'a lieu.

Cependant, il est primordial de comparer les bilans en fonction des utilisations qui sont faites du bois issu des éclaircies : dans le cas où le bois est utilisé en substitution, directe dans le cas du bois énergie, ou indirecte, par exemple avec les usages sous forme de panneaux, le bilan net reste en faveur du stockage de carbone et peut même s'avérer meilleur que sans éclaircies, notamment pour l'utilisation du bois sous forme d'énergie. En revanche, lorsqu'il n'y a pas de substitution, comme c'est le cas lorsque le bois est utilisé pour la fabrication de papiers et cartons, le bilan global est négatif, ce qui signifie que, sur l'ensemble de la période concernée par la vie du peuplement, la filière émet plus de carbone qu'elle n'en absorbe. Une étude affinée de ce résultat pourrait bien entendu prendre en compte plus précisément le devenir des papiers et cartons, notamment dans le cas où ils sont recyclés.

Une remarque importante à ce stade concernant ces bilans : comme cela a déjà été évoqué, le rôle du temps doit être bien pris en compte. Dans la dernière situation évoquée, cas II sans substitution, certes le bilan global est négatif, mais il ne faut pas perdre de vue que pendant toute la durée de croissance, une certaine quantité de carbone a été soustraite du compartiment atmosphérique, souvent pendant quelques décennies en moyenne, et que cet aspect peut ne pas être négligeable.

4.3.4. Influence de l'antécédent cultural

L'usage antérieur des terrains avant plantation de forêt a une influence sur le bilan global :

- Sur le gain de carbone dans le stock sur pied,
- Sur les émissions externes de carbone du fait des consommations d'énergie différentes lors de la sylviculture.

Il est à noter que la consommation d'énergie est sensiblement plus importante encore dans le cas où l'antécédent est une forêt, et où la préparation du terrain nécessite plus d'opérations (dessouchage, exportation de la biomasse...).

Lors de l'établissement d'un peuplement forestier, la biomasse antérieure est détruite, qu'il s'agisse d'une prairie ou d'une terre agricole. Dans la mesure où les quantités de biomasse contenues dans ces biomes, quoique modestes, sont différentes, les bilans de carbone seront différents lors du passage à une terre boisée, selon que le terrain était initialement une prairie ou une terre agricole. Dans les cas I et II présentés, l'antécédent forêt n'est pas considéré. La sensibilité se réduit donc à la différence de comportement du système suivant qu'il est établi après une prairie ou une terre agricole : cette différence n'est pas significative, dans la mesure où, d'une part, elle n'influe que sur le tout début de la formation du stock, et où d'autre part, les différences de stocks sont faible entre la prairie et la terre agricole.

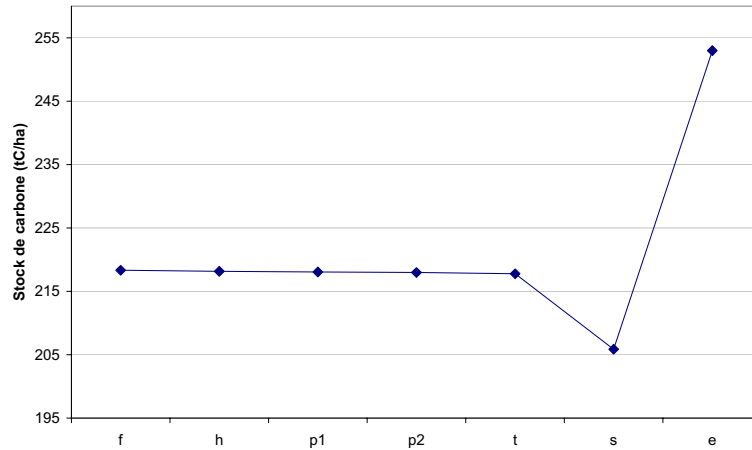


Figure 4. 10 - Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé comme énergie.

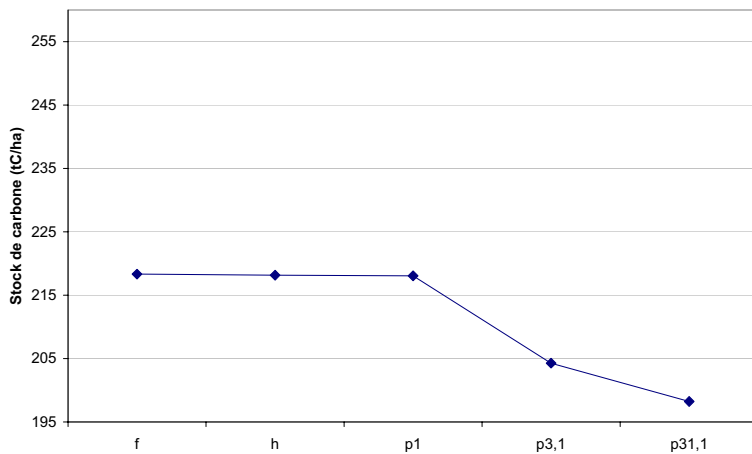


Figure 4. 11 - Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé pour le papier.

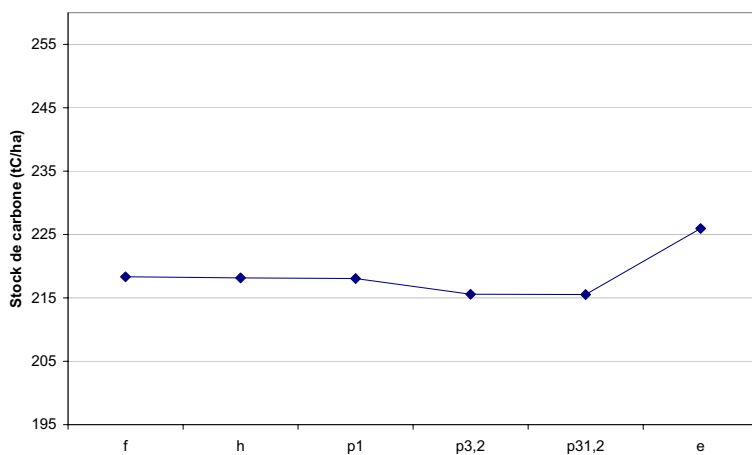


Figure 4. 12 - Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé pour des panneaux.

4.3.5. Calcul d'incertitudes

Dans le cas d'inventaires de données tels que ceux utilisés ici, le calcul des incertitudes est délicat à réaliser analytiquement, notamment du fait de la disparité des lois de probabilités de chacune des incertitudes, quand elles sont connues. Les paramètres nécessaires au calcul du stockage de carbone dans le système sont en outre nombreux, issus de sources disparates et bien souvent exprimés dans des unités différentes.

Le mode de calcul des propagations d'incertitudes peut donc reposer sur des méthodes probabilistes, telles que la méthode dite de Monte-Carlo, ainsi qu'il est suggéré par Blanc et Labouze [Blanc et Labouze, 1999].

La formulation de la donnée de sortie, à savoir la quantité de carbone accumulée sur la période d'observation définie au préalable, est connue en fonction des différentes données d'entrée, pour le cas I et pour chacune des configurations du cas II. Pour le cas I, lorsqu'aucune éclaircie n'est pratiquée, elle s'écrit :

$$\Gamma_{\text{stocké, total}} = \Gamma_{\text{biomasse, total}} - \Gamma_{\text{fossile, total}} \quad (4.1)$$

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \Gamma_{f1} + \Gamma_{f2} = \gamma_{f1} \cdot e_{f1} + \gamma_{f2} \cdot e_{f2} \quad (4.2)$$

Pour le cas II, il faut inclure les contributions des produits :

$$\Gamma_{\text{stocké, total}} = \Gamma_{\text{biomasse, total}} - \Gamma_{\text{fossile, total}} + \Gamma_{\text{substitution, total}} + \Gamma_{\text{produits, total}} \quad (4.3)$$

Les opérations étant différentes en fonction de l'usage qui est fait des bois d'éclaircie, les expressions du total de carbone cumulé sont différentes. Ainsi, pour les trois usages identifiés dans le cas II, les expressions sont les suivantes, pour une éclaircie :

- Bois énergie :

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \Gamma_{f1} + \Gamma_{f2} + \Gamma_h + \Gamma_{p1} + \Gamma_{p2} + \Gamma_t + \Gamma_s \quad (4.4)$$

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \gamma_{f1} \cdot e_{f1} + \gamma_{f2} \cdot e_{f2} + \gamma_h \cdot V_h \cdot e_h + \gamma_{p1} \cdot V_{p1} \cdot e_{p1} + \gamma_{p2} \cdot V_{p2} \cdot \rho_{p2} \cdot \epsilon_{p2} \cdot e_{p2} + \gamma_t \cdot V_t \cdot \rho_t \cdot \epsilon_t \cdot e_t + \gamma_s \cdot V_s \cdot \rho_s \cdot \epsilon_s \cdot e_s \quad (4.5)$$

- Panneaux :

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \Gamma_{f1} + \Gamma_{f2} + \Gamma_h + \Gamma_{p1} + \Gamma_{p3,2} + \Gamma_{31,2} \quad (4.6)$$

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \gamma_{f1} \cdot e_{f1} + \gamma_{f2} \cdot e_{f2} + \gamma_h \cdot V_h \cdot e_h + \gamma_{p1} \cdot V_{p1} \cdot e_{p1} + \gamma_{p3,2} \cdot V_{p3,2} \cdot \rho_{p3,2} \cdot \epsilon_{p3,2} \cdot e_{p3,2} + \gamma_{31,2} \cdot V_{31,2} \cdot \rho_{31,2} \cdot \epsilon_{31,2} \cdot \epsilon_{3,2} \cdot e_{31,2} \quad (4.7)$$

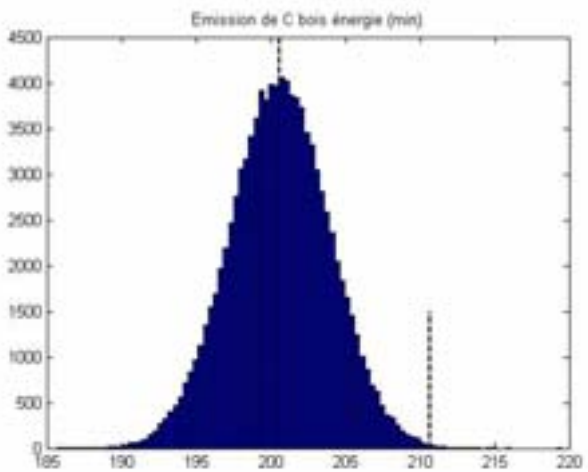
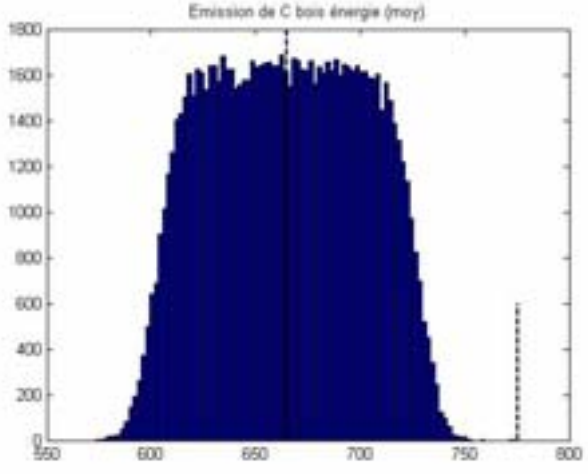
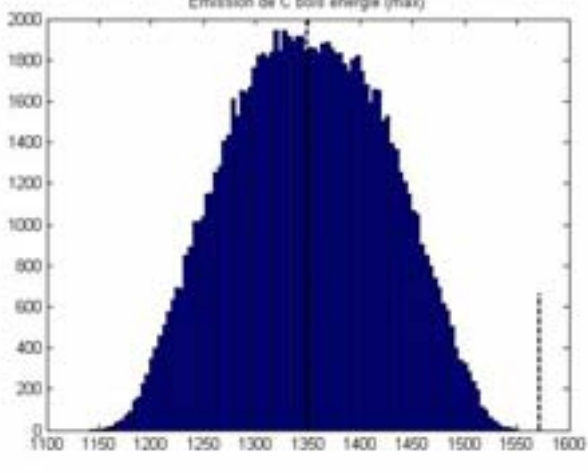
- Papier :

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \Gamma_{f1} + \Gamma_{f2} + \Gamma_h + \Gamma_{p1} + \Gamma_{p3,1} + \Gamma_{31,1} \quad (4.8)$$

$$\Gamma_{\text{fossile, total}} = \gamma_{f1} \cdot e_{f1} + \gamma_{f2} \cdot e_{f2} + \gamma_h \cdot V_h \cdot e_h + \gamma_{p1} \cdot V_{p1} \cdot e_{p1} + \gamma_{p3,1} \cdot V_{p3,1} \cdot \rho_{p3,1} \cdot \epsilon_{p3,1} \cdot e_{p3,1} + \gamma_{31,1} \cdot V_{31,1} \cdot \rho_{31,1} \cdot \epsilon_{31,1} \cdot \epsilon_{31,1} \cdot e_{31,1} \quad (4.9)$$

Les incertitudes portent essentiellement sur les coefficients d'émissions de carbone pour chaque opération. Il est supposé que les quantités d'énergie unitaires, les rendements matières et la densité des produits ont des valeurs constantes. Les autres paramètres, notamment concernant les quantités de bois exporté, constituent des scénarios différents plus que de réelles incertitudes, et font donc l'objet des études de sensibilité.

Tableau 4. 6 - Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de bois énergie (pour chaque niveau, minimum, moyen ou maximum). Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

	Moyenne en kg C/ha	Écart-type en kg C/ha
 <p>Emission de C bois énergie (min)</p>	200,6	3,3
 <p>Emission de C bois énergie (moy)</p>	665	36,8
 <p>Emission de C bois énergie (max)</p>	1350	74

Le Tableau 4. 2 donne les estimations des différentes incertitudes correspondant aux coefficients d'émissions de carbone pour chaque consommation d'énergie externe identifiée. En ce qui concerne les combustibles fossiles, les incertitudes sur les émissions de gaz à effet de serre sont dépendantes principalement de la composition du combustible. Or ces sources d'énergie sont relativement bien connues et l'incertitude peut être estimée par défaut à 5 %, en considérant une distribution de type normal autour de la valeur moyenne [Jancovici, 2003]. Dans le cas de l'électricité, les incertitudes peuvent être plus importantes, car les modes de calcul des facteurs d'émissions sont variables d'une source à une autre. Le facteur retenu ici est de 10 %, avec une fois encore une distribution normale autour de la valeur moyenne.

Les facteurs d'émissions les plus incertains sont ceux concernant les consommations de matériaux à contenu énergétique pour des usages non énergétiques, à savoir les engrais, les huiles, les résines et les filets de protection pour la plantation des jeunes arbres. Il est choisi ici de caractériser les incertitudes liées à ces facteurs d'émission par une loi uniforme représentant la plage de valeurs identifiées dans la littérature et correspondant en fait aux divers modes de production d'énergie dans chacun des cas.

Les résultats des simulations sont consignés dans les tableaux 4.6, 4.7 et 4.8. Ils sont relatifs au cas II, pour lequel les émissions de carbone dues à l'utilisation d'énergie externe sont cumulées depuis la plantation jusqu'à la première éclaircie et l'utilisation du bois exporté pour chacun des trois usages identifiés. La propagation d'incertitudes n'est pas identique suivant les produits issus de la récolte et suivant les scénarios d'utilisation des déchets d'éclaircies (énergie, papier ou panneaux de bois) :

- lorsque les consommations d'énergie sont principalement liées aux énergies fossiles et à l'électricité, le calcul d'incertitude est bien maîtrisé, puisque le total des émissions suit une distribution normale,
- en revanche, dans certains cas, où les consommations d'énergie externe sous forme non énergétique sont importantes, la forme de la distribution des résultats est plus délicate à utiliser, et l'utilisation de la valeur moyenne est en particulier moins pertinente.

4.4. ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION

4.4.1. Paramètres pertinents, goulots d'étranglement

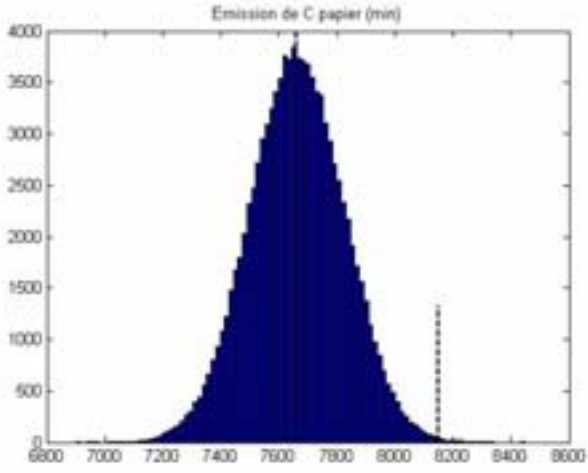
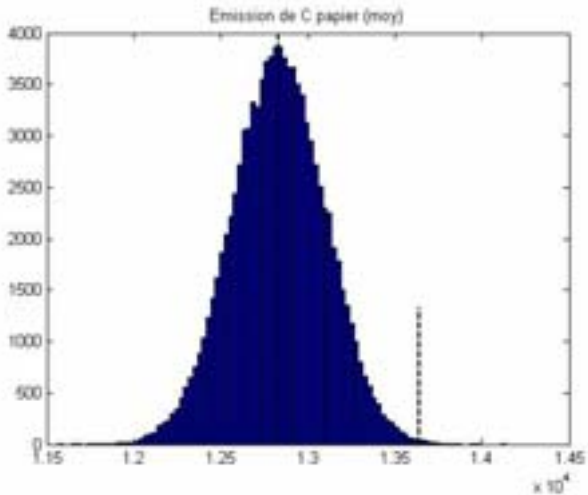
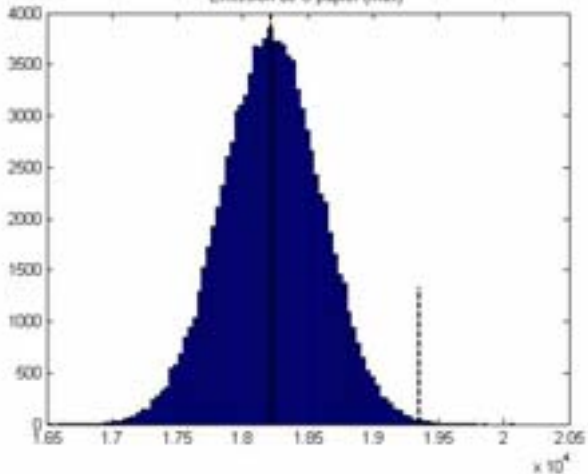
Dans le cas du seul stockage de carbone, les paramètres pertinents sont donc les suivants :

- Le type de forêt plantée, qui détermine la cinétique de croissance et donc le stockage,
- Le type de gestion, avec ou sans éclaircies,
- L'usage du bois d'éclaircies le cas échéant et le type de substitution.

L'usage antérieur des terres, dans le cas où il ne s'agit pas d'un reboisement après coupe rase, n'a pas d'influence significative.

L'usage éventuel du bois d'éclaircie a une influence importante sur le bilan en carbone, en particulier s'il permet de substituer du bois à d'autres matériaux ou énergies (Figure 4. 10, Figure 4. 11, et Figure 4. 12).

Tableau 4. 7 - Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de papier (pour chaque niveau, minimum, moyen ou maximum). Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

	Moyenne en kg C/ha	Écart-type en kg C/ha
	7662	163
	12832	269
	18220	377

4.4.2. Potentiel à grande échelle

À partir des évaluations unitaires décrites précédemment, il est possible d'approcher la valeur du potentiel d'utilisation pour le seul stockage de carbone des forêts à l'échelle mondiale. Pour cela, il y a lieu de tenir compte des disparités régionales et de l'influence de ces disparités sur les différents coefficients, et principalement sur les paramètres de croissance des forêts.

La première donnée indispensable pour le calcul à l'échelle globale est la surface totale disponible pour la plantation de nouvelles zones de forêt, et sa répartition en fonction des zones géographiques. Cette donnée est ensuite complétée par les valeurs des productions primaires de biomasse en fonction des régions identifiées, ainsi que par les valeurs de la mortalité et du taux de respiration.

L'estimation des surfaces disponibles pour la plantation de nouvelles forêts doit tenir compte des contraintes de l'alimentation pour l'usage des sols. Les surfaces disponibles correspondront alors aux territoires abandonnés par l'agriculture ou l'élevage. Deux estimations des terres disponibles [Dameron, 2004], obtenues selon des scénarios de demande alimentaire différents, peuvent être utilisés pour cette estimation. Le premier scénario, estime à 943 Mha les surfaces disponibles pour l'établissement de nouvelles forêts à l'horizon 2050. Ce scénario correspond à une situation où les rendements de production agricole sont importants, d'où une plus grande surface disponible pour la plantation de forêts. Le deuxième scénario évalue les terres abandonnées par l'agriculture à 147,4 Mha, en se basant sur une croissance plus importante de la population et des rendements agricoles plus faibles.

Dès lors, il est possible d'estimer, à l'horizon 2050, le potentiel d'utilisation des forêts pour le seul stockage de carbone. Le stock sur pied s'établissant à l'échelle mondiale s'élèverait alors, pour le premier scénario, à 210 Gt C et pour le deuxième, à 31 Gt C, ce qui correspond, sur la période considérée, à un stockage de 4,2 Gt C/an dans le premier cas et 0,62 Gt C/an dans le deuxième cas.

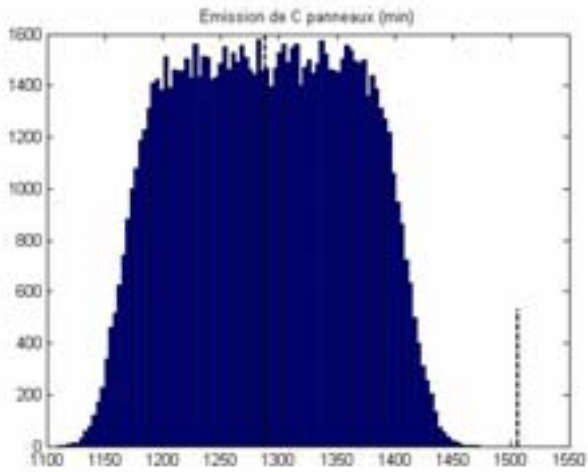
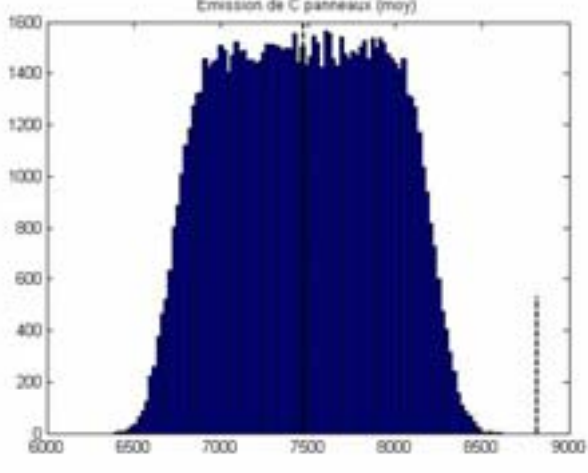
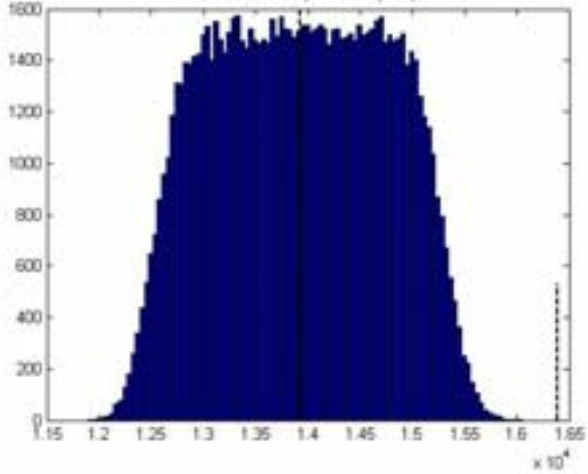
Dans un bilan net, en généralisant, en première approximation, au cas mondial, les émissions dues aux travaux culturaux représentatives d'une situation française les émissions nettes de carbone liées à l'utilisation de combustibles fossiles s'élèveraient dans le premier cas à une valeur comprise entre 0,2 et 1,1 Gt C, et dans le deuxième cas à une valeur comprise entre 0 et 0,2 Gt C. Les émissions de carbone issues des combustibles fossiles sont donc tout à fait négligeables dans un bilan à l'échelle mondiale.

4.4.3. Rendement de l'opération de stockage

Les deux études de cas présentées permettent d'évaluer en ordres de grandeur les efficacités de stockage de carbone dans deux configurations différentes (Tableau 4. 5) :

- le stockage seul de carbone sans exportation de biomasse hors de la parcelle (cas I),
- le stockage de carbone « amélioré » par des pratiques d'éclaircies et l'utilisation du bois récolté lors de ces interventions sur la parcelle.

Tableau 4. 8 - Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de panneaux de bois (pour chaque niveau, minimum, moyen ou maximum). Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

	Moyenne en kg C/ha	Écart-type en kg C/ha
	1288	73
	7476	448
	13922	823

Dans le cas du stockage seul de carbone, pour des paramètres représentatifs des forêts d'Europe Occidentale, environ 220 t C/ha peuvent être stockées par le boisement de terres non initialement couvertes de forêts, par la mobilisation d'une quantité d'énergie comprise entre 0,2 et 1,1 tep/ha (soit entre 7960 et 45430 MJ/ha), sur toute la durée du régime transitoire de la croissance des forêts. Cette quantité d'énergie externe mobilisée est la source d'un flux d'émission de carbone vers l'atmosphère compris entre 0,22 et 1,15 t C/ha, respectivement pour la valeur minimale et maximale de consommation d'énergie.

L'efficacité de stockage, dans le cas I, définie comme le rapport de la quantité de carbone effectivement stockée au carbone capté par l'écosystème, est alors pratiquement égale à 1.

La pratique d'éclaircie se traduit par une mobilisation supplémentaire d'énergie externe, comprise entre 0,5 et 30,3 tep/ha (soit entre 22,6 et 1275 GJ/ha), selon les usages qui sont faits du bois d'éclaircie. Dans le cas du régime transitoire, ce surcroît d'énergie, induisant un flux d'émissions de carbone supplémentaire, n'implique un gain dans le bilan de carbone par rapport au cas I que si le bois exporté est substitué, soit sous forme d'énergie, soit sous forme de matériau, par exemple dans les panneaux pour certains usages. Dans le cas du régime pseudo-permanent, cet effet est d'autant plus manifeste que l'écosystème du cas I, en état pseudo-permanent, ne capte pratiquement plus de carbone supplémentaire.

L'efficacité de stockage, dans le cas II, est alors comprise entre 0,73 et 1,32 sur la période de référence correspondant au régime transitoire, les valeurs les plus basses correspondant aux cas où il n'y a pas de substitution et la valeur la plus élevée correspondant à l'utilisation du bois pour l'énergie. Sur la période de référence correspondant au régime établi, l'efficacité de stockage du cas II est comprise entre -12,6 et 22,6. Une valeur négative de l'efficacité signifie bien sûr que la quantité de carbone émise du fait de l'utilisation d'énergies fossiles externes est supérieure à la quantité de carbone qui a été captée en amont par l'écosystème.

Ces premières études de cas mettent bien en avant l'importance de la période de référence à laquelle se rapporte l'estimation du stockage effectif, ainsi que la nécessité de valoriser le bois par substitution dans le cas où un surcroît d'énergie est apporté au système. Les cas I et II soulignent également la nécessité de prendre en compte l'ensemble de la filière bois et notamment le bois énergie. Ces aspects font l'objet des chapitres 5 et 6.



Le hêtre (*Fagus sylvatica*) couvre en France une surface de 1,1 Mha.

5. APPLICATION DE LA DÉMARCHE À LA PRODUCTION DE BOIS DE PIN MARITIME EN AQUITAINE

5.1 DESCRIPTION DU CAS ÉTUDIÉ (CAS III)

5.1.1 Description de la filière issue du Pin Maritime (*Pinus Pinaster Ait*) en Aquitaine

Les forêts de pin maritime couvrent en France 1,36 Mha, dont 0,85 Mha en zone de futaie régulière correspondant au massif forestier landais qui s'étend sur trois départements, les Landes, la Gironde et le Lot-et-Garonne. Le massif forestier des Landes d'Aquitaine correspond à la zone située sur ces trois départements aquitains, bien que l'essence de pin maritime soit également présente jusqu'en Dordogne, où le mode de culture y est différent de la futaie régulière (futaie irrégulière notamment). Le massif dans son entier couvre plus d'un million d'hectare, dont 80 % sont occupés par le pin maritime, et seulement 20 % par les autres essences, dont notamment le chêne. Le couvert forestier d'Aquitaine est assez élevé (45 % de la surface totale), en particulier relativement au taux national moyen de couverture forestière, situé à environ 27 % du territoire [données IFN, 2004]. Historiquement, la forêt des Landes a eu de multiples usages (Encadré 5. 1). Elle a été mise en place pour drainer les sols et les stabiliser, puis a été exploitée pour la production de poteaux de mines et de gemme utilisée pour la fabrication de l'essence de térébenthine. Sa fonction principale aujourd'hui est essentiellement la production de bois, destiné à différents usages, qui seront détaillés dans la suite de ce chapitre.

En ce qui concerne l'essence de pin maritime, la part de matière première importée dans la région Aquitaine est relativement faible : elle s'élève à environ 3 % de la ressource totale et se présente sous forme de plaquettes (bois de trituration). Les pratiques de récolte sont soit des coupes rases, qui produisent 70 % du volume de bois de pin maritime récolté en Aquitaine, soit des éclaircies, produisant les 30 % restants [IFN, 2004]. La majeure partie du bois récolté est destinée au bois d'oeuvre, tandis que l'essentiel des bois d'éclaircie est utilisé pour la trituration.

Une analyse des utilisations du bois de pin maritime récolté en Aquitaine est présentée Figure 5. 1 et Figure 5. 2. Compte tenu des éléments rassemblés, il est raisonnable de penser que tous les déchets de transformation sont valorisés dans la filière, les seuls déchets non explicitement valorisés étant les déchets de récolte laissés sur place, qui peuvent toutefois être valorisés par autoconsommation (bois de feu principalement) et qui ne sont alors pas comptabilisés dans les différentes sources statistiques. Le rendement d'utilisation de la ressource semble donc particulièrement élevé : il est dans ces conditions de plus de 78 %, en définissant le rendement d'utilisation comme le rapport en équivalent bois rond des produits finaux (c'est-à-dire en incluant les pertes successives dues aux différentes phases de transformation) sur la production brute disponible en forêt. Le bois non récolté est alors soit perdu par mortalité ou déchets, soit accumulé dans la biomasse sur pied. Le mode de valorisation des déchets de transformation est essentiellement de la trituration, qui en équivalent bois récolté représente un volume plus important que les utilisations bois d'oeuvre.

Encadré 5. 1 - Historique du massif forestier des Landes d'Aquitaine

Le massif de pin maritime des Landes d'Aquitaine est une bonne illustration des multiples fonctions remplies par les forêts. À l'origine du massif, le pin maritime a été planté, à la fin du 18ème siècle, sous l'impulsion de l'ingénieur Nicolas Brémontier, pour la fixation des dunes côtières par le boisement, dans la mesure où cette essence est particulièrement adaptée aux sols sableux et aux conditions climatiques de la région. Par la suite, cette essence sera utilisée pour contribuer à l'assèchement des zones de marécages, notamment sous l'action de François Chambrelent au 19ème siècle.

En ce qui concerne les productions, la forêt des Landes d'Aquitaine a longtemps été utilisée pour la production de gomme, qui a diminué au fil des années pour laisser place à la production de bois, principalement à destination de la trituration aujourd'hui (papier et carton, panneaux de fibres et de particules), mais également pour les activités de sciage, à forte valeur ajoutée.

La productivité de la forêt des Landes d'Aquitaine a triplé en 50 ans, passant de 3,5 à 9,5 m³/(ha.an).

Le bois énergie semble ne représenter qu'une petite partie de la filière, avec 6,7 % de la ressource sur pied, sans tenir compte de la contribution éventuelle de l'autoconsommation des déchets de récolte. Ceux-ci ne sont donc pas comptabilisés dans le bilan de la filière globale. Il est à noter cependant que beaucoup d'industries de transformation valorisent leurs déchets sous forme d'énergie, et notamment la filière papier, où la liqueur noire est très souvent réutilisée pour la production d'énergie, et qui peut représenter entre 30 et 60 % de la demande totale en énergie de l'installation [Giraldo et Hyman, 1995], ou les scieries qui peuvent utiliser les sciures pour alimenter les chaudières par exemple.

L'ameublement et les agencements intérieurs représentent également une part importante des produits finaux de la filière : ils mobilisent environ 22 % de la ressource utile totale (en incluant la matière première importée). Une grande partie du bois scié est par ailleurs utilisée pour la production de palettes ou autres emballages lourds, au détriment du bois de construction.

En ce qui concerne la filière papier et cartons, l'essentiel de la production en Aquitaine est constitué de papier kraft et de papier d'emballages, les papiers industriels et d'hygiène ne représentant qu'un tiers de la production de papier en équivalent bois rond.

5.1.2 Le cas étudié (cas III)

a) Frontières du système et répartition des productions de pin maritime

L'objectif de ce chapitre est de décrire, dans le cadre du cas III, une filière bois complète du point de vue de son action sur le stockage du carbone, c'est-à-dire en effectuant un bilan complet incluant à la fois le stockage sur pied et le stockage dans les différents produits, mais aussi toutes les émissions de gaz à effet de serre liées aux dépenses énergétiques lors des transformations successives du bois et à la fin de vie des produits. Cette étude de cas complète bien les deux précédentes, dans la mesure où elle permet de comprendre comment les peuplements exploités et les produits du bois peuvent participer activement au stockage du carbone, de la même façon qu'un écosystème laissé en libre croissance.

Le système est constitué du peuplement de pin maritime de la forêt des Landes d'Aquitaine et des productions de bois qui en sont récoltées. Cette étude de cas se positionne donc à une échelle régionale. Le système est supposé être en régime pseudo-permanent, c'est-à-dire qu'il ne sera pas tenu compte d'éventuelles variations dans la répartition des parcelles par classes d'âge, ni de l'évolution du marché des produits du bois au cours des années : les valeurs des productions de bois sur pied, de la production de bois récolté et de la répartition entre les différents produits correspondent aux données les plus récentes issues de la bibliographie, et sont donc considérés en première approximation comme constantes.

Les données sur les différents flux, et notamment sur les flux de matière ligneuse et de produits du bois, sont souvent issues de sources dispersées, dont les unités de comptabilisation sont différentes. Elles sont ainsi exprimées tantôt en m³ de bois rond, en tonnes, notamment pour le papier et les pâtes, en m³ de produits, comme pour les différents panneaux de bois... Un grand nombre d'informations supplémentaires a donc été utilisé pour rendre homogènes toutes ces données (rendements matière, masses volumiques des produits du bois aux différents stades de transformation...).

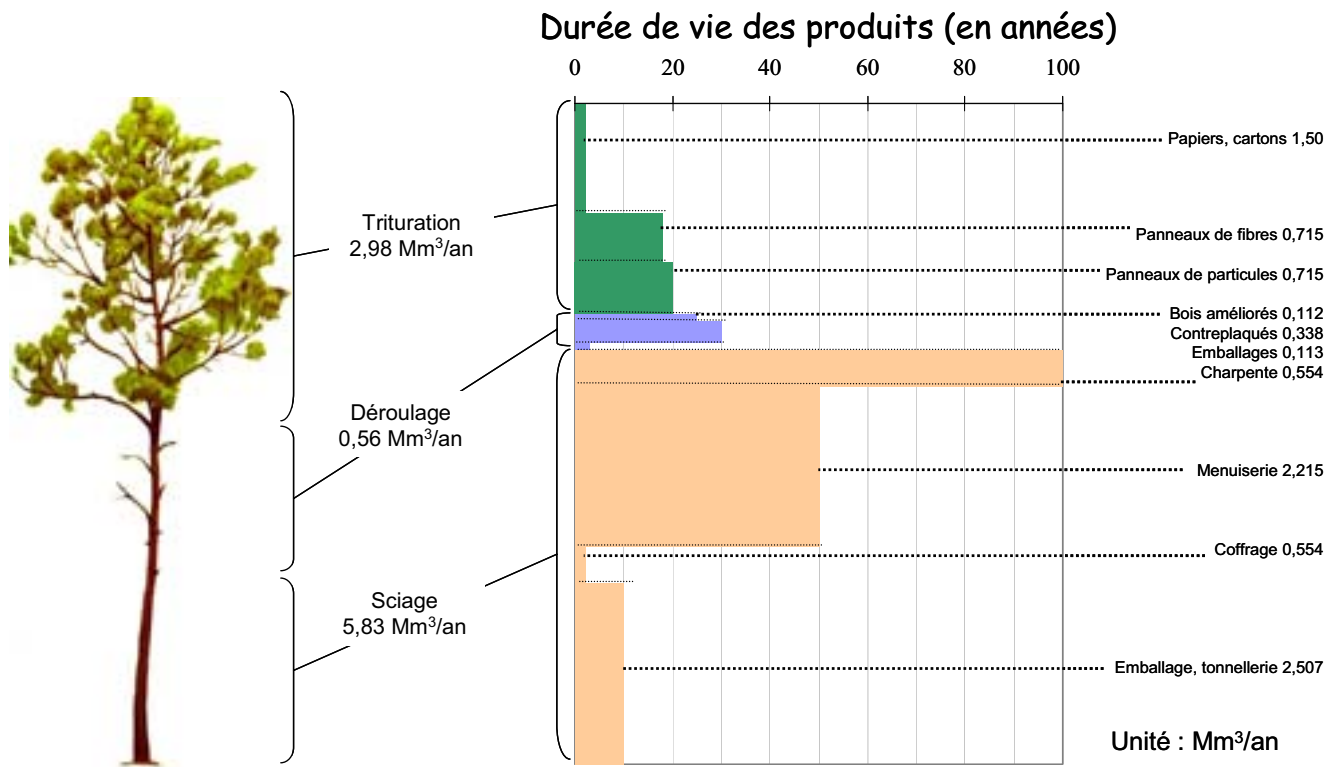


Figure 5. 1 - Une répartition réelle possible des utilisations du pin maritime en Aquitaine, pour l'année 2000

Les bilans d'énergie et de carbone sont faits depuis la sylviculture jusqu'à la fin de vie des produits, en distinguant autant que possible toutes les utilisations et transformations intermédiaires. Compte tenu de l'hétérogénéité mentionnée auparavant, certaines hypothèses ont été nécessaires pour effectuer un bilan des flux de matière sur la filière complète. Ainsi, les flux proposés dans la Figure 5. 2 supposent que :

- les flux exportés de la zone régionale étudiée sont répartis entre les différents produits finaux de la même façon que les flux utilisés en Aquitaine, ce qui se traduit sur le schéma par l'absence d'agrégat pour l'exportation,
- la totalité des déchets de première transformation (copeaux, sciures, écorces et chutes diverses) est valorisée soit dans la filière trituration soit sous forme d'énergie, la répartition de ces usages étant déduite par complément entre la quantité de produits finis et la ressource disponible.

Les fins de vie des produits, que ce soit à l'échelle globale ou même à l'échelle du cas étudié, sont assez mal connues dans l'ensemble, sauf pour des cas très particuliers, comme les palettes de bois par exemple, qui, après avoir été réparées et réutilisées, sont souvent valorisées soit sous forme d'énergie, soit sous forme de bois de trituration. Dans les autres cas, la fin de vie la plus probable correspond à une mise en décharge, de type Centre d'Enfouissement Technique. Dans le cas général, les biogaz ne sont pas récupérés et sont soit torchés, soit réémis dans l'atmosphère. D'autres fins de vie sont envisageables, comme la valorisation énergétique, qui présente un intérêt particulier dans le contexte de ce travail, ou éventuellement la valorisation dans la filière trituration. Ces autres configurations possibles font l'objet d'études de sensibilité dans la suite du présent chapitre.

À la différence des cas I et II, la situation du cas III est considérée comme quasi-permanente, hypothèse qui prend d'autant plus de sens que le territoire considéré comprend tout à la fois des peuplements jeunes et matures et que le massif est ancien et exploité depuis longtemps. L'estimation des stocks se fait quant à elle séparément pour les peuplements en place et pour les produits.

Dans le cas des produits, dans la mesure où les données disponibles sont relatives à des flux annuels, il est nécessaire d'estimer les durées de vie des produits pour connaître le stock en place. Les stocks seront estimés simplement comme le produit d'un flux et de sa durée de vie supposée. Pour cela, les catégories suivantes ont été distinguées, selon un découpage couramment utilisé [e.g. Apps et al., 1999 ; Buchanan et Levine, 1999 ; CTBA, 2002 ; Lochu, 2002 ; Malfait et al., 2003], correspondant notamment à des segments industriels homogènes : bois énergie, bois dans la construction, ameublement, emballage et une dernière catégorie regroupant papiers et cartons. Ces cinq catégories peuvent regrouper des usages de durées de vie hétérogènes, notamment dans le cas de la construction ou de l'ameublement où les produits peuvent être massifs ou bien recomposés (panneaux de fibres ou de particules...), mais sont en accord avec les différentes données issues de la littérature. Les différentes hypothèses relatives aux durées de vie issues de la littérature ainsi que les valeurs retenues comme références pour l'étude du cas III sont consignées dans le Tableau 5. 2.

En ce qui concerne le stockage sur pied, le pin maritime est une essence relativement bien renseignée, notamment à l'échelle de l'Aquitaine. La connaissance de la répartition du peuplement de pin maritime en Aquitaine selon les classes d'âge des arbres permet de calculer le stock sur pied, dans la biomasse et dans le sol. Ce calcul peut se faire comme indiqué dans le chapitre 2, sur la base d'une courbe de croissance de l'écosystème. La connaissance de la répartition par classe d'âge permet de déterminer le stock et le taux annuel de croissance et d'en déduire la quantité de carbone fixé par le massif dans son ensemble, moyennant une hypothèse sur la teneur en carbone de la matière sèche accumulée, estimée dans ce travail à 0,5 t C/t ms.

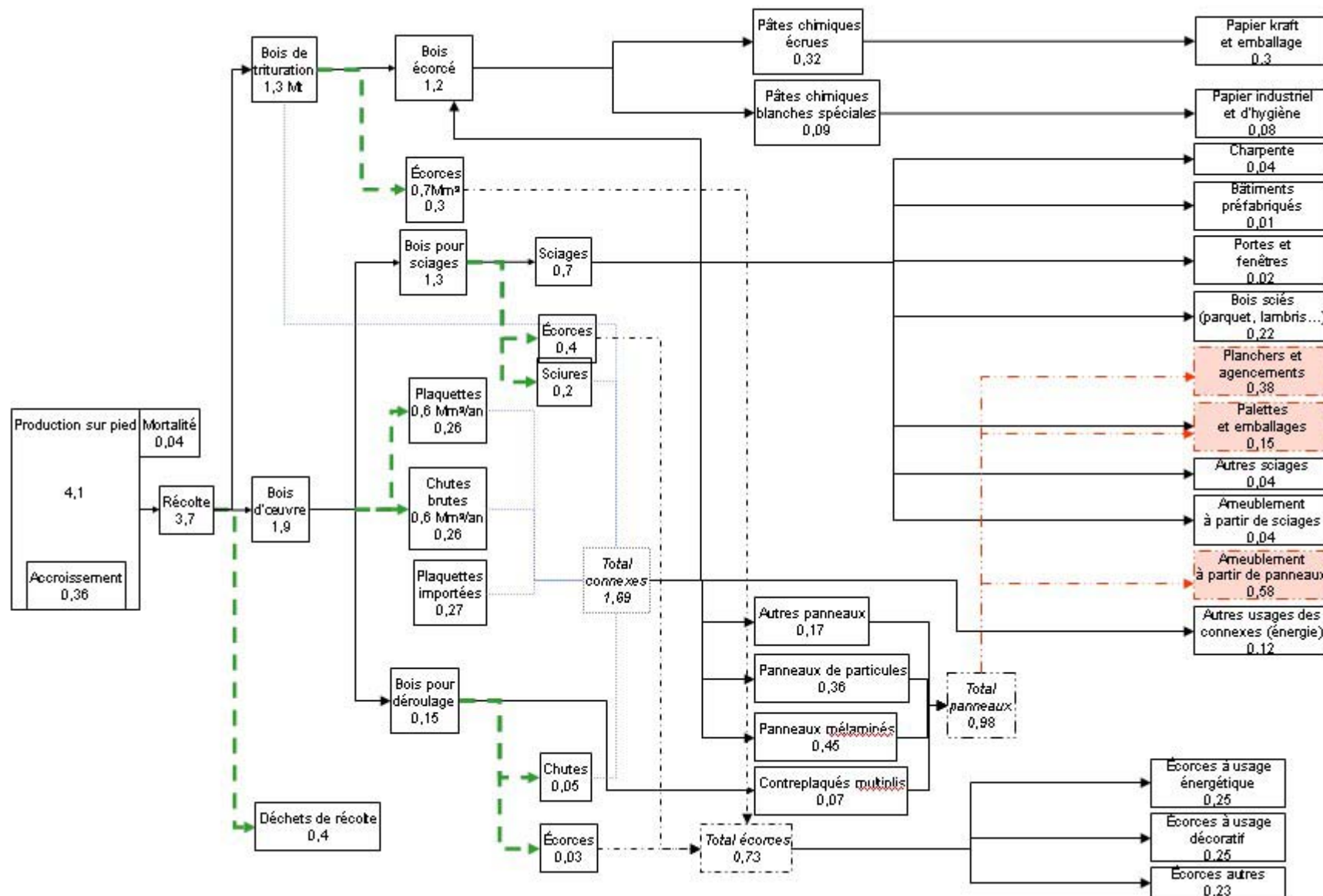


Figure 5.2 - Production et utilisations de pin maritime en Aquitaine : les flux et leur répartition en Mt de bois par an, d'après les données de Malfait et al., 2003.

Le lien entre le stockage sur pied et les produits du bois se fait par la mesure de la quantité de bois récoltée chaque année. La quantité de carbone totale exportée du peuplement vers les produits est déterminée à partir du volume récolté, de la densité du bois et d'un facteur d'expansion, correspondant au rapport du volume total de biomasse dans un arbre au volume du tronc [Chantal, 2001]. Dès lors, connaissant la quantité de bois nécessaire pour la fabrication des différents produits, il est possible de déterminer la part de biomasse laissée sous forme de déchets de récolte.

Sur la base de ces différentes définitions, les expressions en quantité de carbone du taux annuel de croissance et de la part de biomasse exportée lors des récoltes sont les suivantes, en utilisant les notations du chapitre 2 :

$$dS/dt = A \cdot \Delta \cdot f_C \quad (5.1)$$

$$S = B_{tr} \cdot \rho \cdot f_E \cdot f_C \quad (5.2)$$

$$\text{Total exporté} = x B_{tr} \cdot \rho \cdot f_E \cdot f_C \quad (5.3)$$

b) Les étapes prises en compte et le schéma opérationnel

Pour faciliter la lecture du schéma opérationnel du système, certaines étapes ont été regroupées (Figure 5. 3). Ainsi, les opérations de transport après première et deuxième transformation, la distribution des produits finis et le séchage sont regroupés dans l'opération immédiatement précédente. Par ailleurs, toujours dans un souci de lisibilité, le flux de déchets de transformation n'a pas été systématiquement indiqué. Ainsi, il est sous-entendu au niveau des opérations p_{31} , p_{32} , p_{23} , p_4 et p_5 . Enfin, en-dehors du cas où le bois est utilisé pour la production d'énergie, le schéma opérationnel n'indique pas les étapes de fin de vie, mais s'arrête à la phase d'utilisation. Comme il l'a déjà été évoqué précédemment, c'est dans le cas général la mise en décharge qui a été retenue pour la fin de vie des produits.

La fabrication des produits finis met en œuvre un certain nombre de flux annexes à celui du bois seul, comme notamment les éléments de fixation (clous, agrafes, vis, résine ou autre substance de fixation). Deux problèmes peuvent alors se poser : la disponibilité des données concernant ces flux et la pertinence de leur prise en compte. Dans le cas des panneaux de bois, l'utilisation de la résine est un poste important de la consommation énergétique. Il convient donc de le prendre en compte. En revanche, pour ce qui est des autres éléments de fixation, il a été choisi, en accord avec d'autres études, de ne pas négliger leur contribution dans le bilan énergétique, à la fois en supposant qu'elle est relativement faible et faute de données suffisamment pertinentes.

Enfin, les flux liés à la construction des infrastructures et des machines de production ont été négligés, en supposant que le système fonctionne en régime pseudo-permanent et que par conséquent les impacts liés à ces flux sont amortis sur toute la durée de vie des installations et machines.

En ce qui concerne les transports, la consommation d'énergie est exprimée comme une distance d'une opération à une autre, pour une certaine quantité transportée. Les distances suivantes ont été retenues, pour un transport par camion de 24 t, et consommant 38 litres de carburant pour 100 km à pleine charge, et les 2/3 à vide :

- de l'exploitation à la première transformation : 60 km, avec un retour à vide,
- de la première à la deuxième transformation : 200 km,
- de la deuxième transformation à l'utilisation : 120 km, avec un retour à vide,
- de l'utilisation à la fin de vie : 50 km.

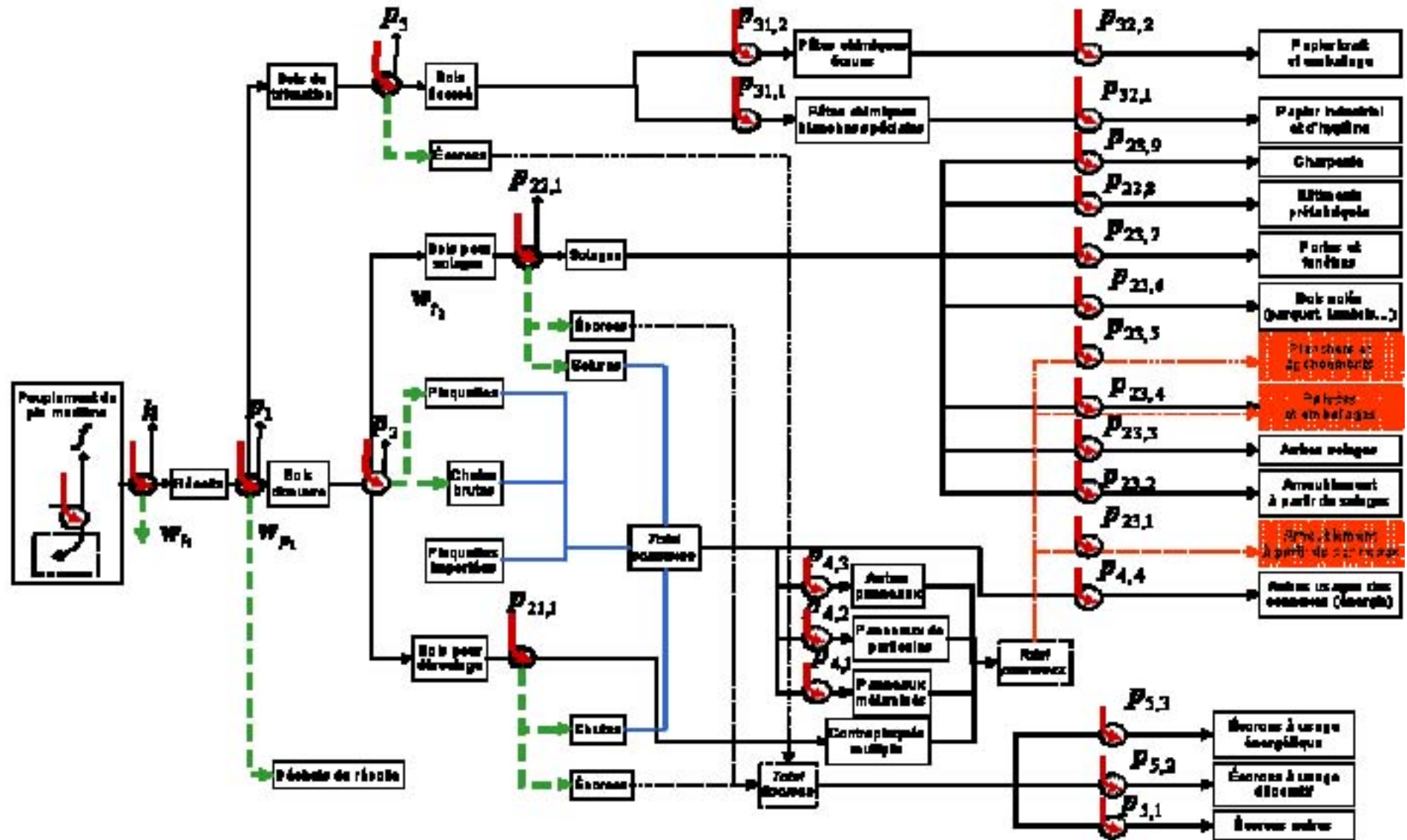


Figure 5.3 - Schéma opérationnel du cas III : production et utilisations de pin maritime en Aquitaine

5.2 APPLICATION DE LA DÉMARCHE PROPOSÉE AU STOCKAGE DE CARBONE AVEC PRODUCTION DE BOIS

5.2.1 Flux de carbone et flux d'énergie

a) Flux liés à l'activité de la biomasse

À titre de comparaison avec les autres flux d'énergie traversant le système étudié, il est possible d'estimer la quantité d'énergie solaire mobilisée par le massif forestier de pin maritime des Landes de Gascogne. Une partie de ce flux est contenue dans les récoltes annuelles, et est donc transférée entre les différentes opérations successives. Pour estimer l'évolution de ce flux d'énergie potentielle au fil des transformations, le contenu énergétique de la biomasse est pris égal à son pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui pour le bois anhydre s'élève à 18,2 GJ/t. Pour les calculs, l'hypothèse est faite que le bois vert de pin maritime a une humidité de 47 % (humidité base sèche). La quantité d'énergie solaire atteignant les surfaces de pin maritime correspondant au massif des Landes s'élève à environ $4,3 \cdot 10^{10}$ GJ/an. Or la production brute annuelle est d'environ $9140 \cdot 10^3$ m³ [IFN, 2004], soit une production totale de biomasse de $6288 \cdot 10^3$ t ms/an, en utilisant une valeur de la densité du pin maritime de 0,43 t ms/m³ et une valeur du coefficient d'expansion de 1,6 [Chantal, 2001], ce qui représente une quantité d'énergie d'environ $114 \cdot 10^6$ GJ/an, en supposant que le contenu énergétique de la biomasse produite est égal au PCI du bois. D'après ces calculs, le rendement énergétique de la production végétale nette, défini comme le rapport de l'énergie disponible à la production végétale, est d'environ 0,27 %. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que celui estimé par Bonnet [Bonnet, 1998], en moyenne à l'échelle globale, qui vaut 0,45 %.

Le suivi du flux d'énergie (Figure 5. 4) contenue dans la biomasse montre que le rendement d'utilisation énergétique est relativement faible, de l'ordre de 0,9 %, puisque seulement $25 \cdot 10^3$ tep (ou $1055 \cdot 10^3$ GJ) sont a priori valorisée sous forme d'énergie, sur les 2,72 Mtep ($114 \cdot 10^6$ GJ) disponibles lors de la production de biomasse.

Le système est considéré comme étant en régime permanent, mais le peuplement sur pied croît en permanence, dans la mesure où il est exploité et où par conséquent les flux de carbone captés lors de la croissance ne sont pas totalement compensés par les flux de respiration autotrophe et hétérotrophe. Le calcul du flux annuel net de stockage dans l'écosystème sur pied fait intervenir différents paramètres :

- La production primaire nette de l'écosystème, c'est-à-dire le flux de stockage brut, qui dépend de l'âge de chaque parcelle,
- La mortalité, qui s'exprime comme une fraction du stock de biomasse,
- Le taux d'émissions de carbone par respiration hétérotrophe, qui dépend lui de la teneur en carbone du sol.

Il est donc nécessaire, comme il a déjà été précisé auparavant, de connaître la répartition des surfaces par classe d'âge dans le massif pour déterminer les deux premiers paramètres, et le stock de carbone dans le sol pour calculer le troisième. Les valeurs des dynamiques de stockage dans les sols forestiers sont à ce jour encore mal renseignées et il est délicat d'utiliser une valeur moyenne globale, peu pertinente pour une étude de cas à l'échelle régionale. Aussi, dans les calculs suivants, seul le carbone contenu dans la biomasse sera pris en compte, tandis que les échanges avec le sol seront négligés, faute de données pertinentes.

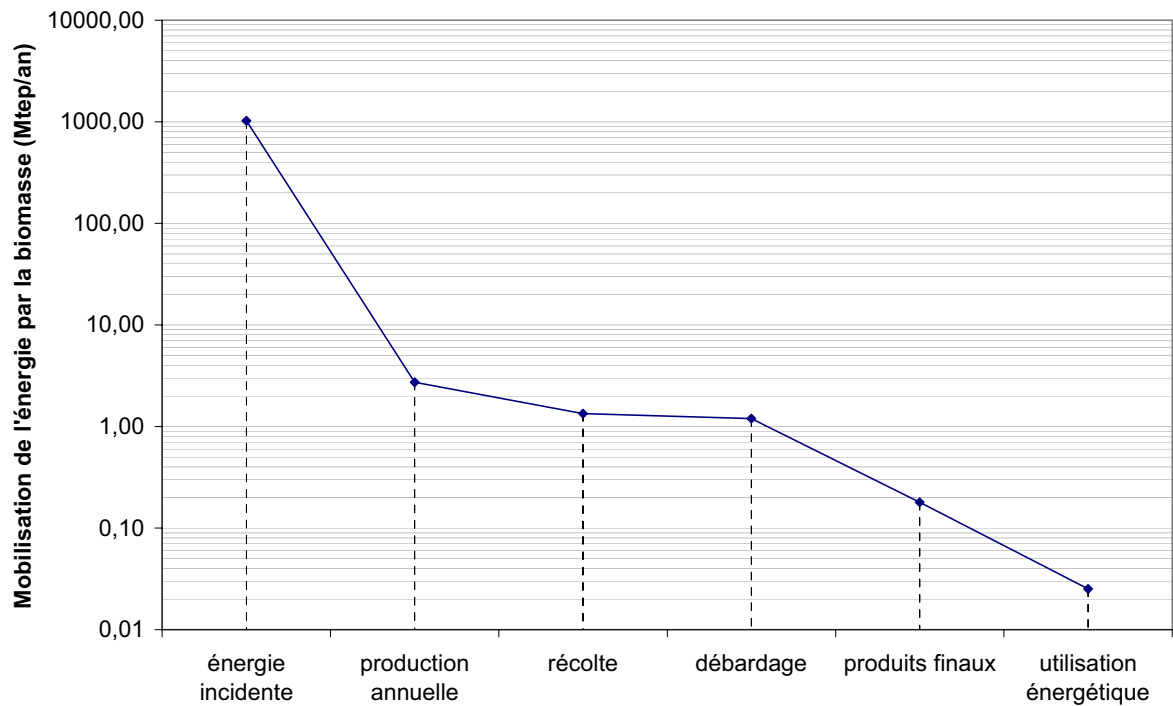


Figure 5. 4 - Variation du contenu énergétique du bois aux divers stades de transformation, depuis le flux d'énergie disponible sur la surface totale de futaie de pin maritime du massif des Landes d'Aquitaine (0,85 Mha) jusqu'à l'utilisation énergétique de la biomasse

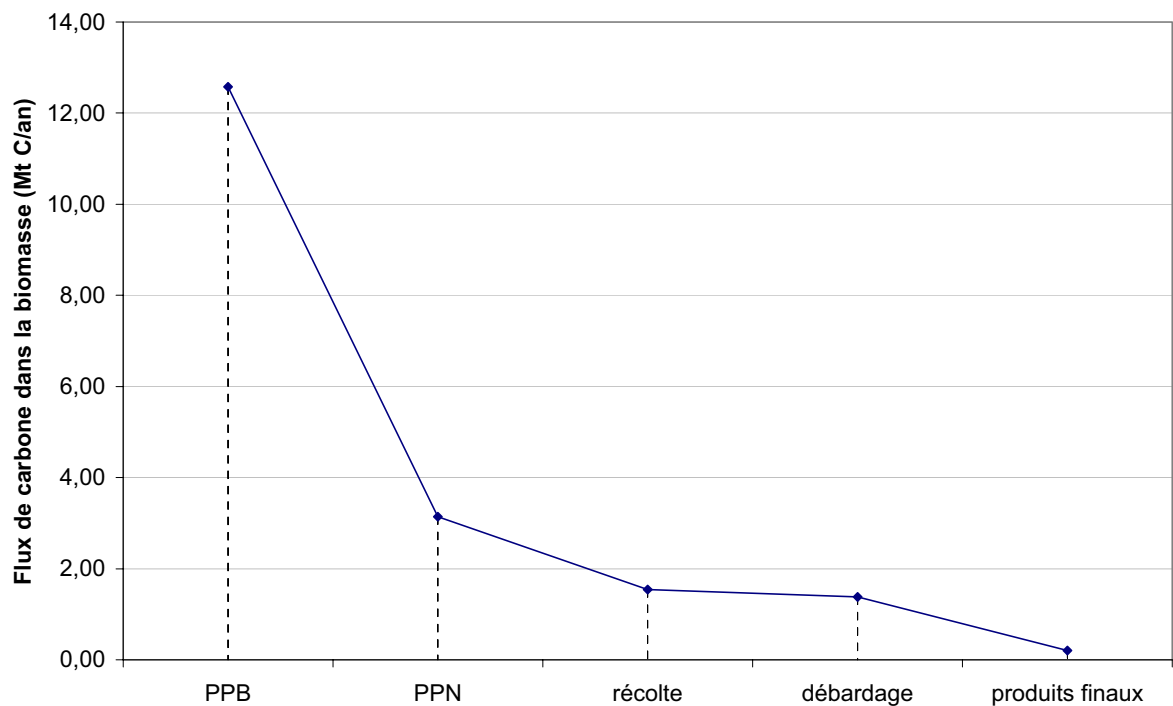


Figure 5. 5 - Variation du contenu en carbone du bois aux divers stades de transformation, depuis le flux capturé lors de la production primaire brute par l'écosystème jusqu'à la répartition entre les produits finis

Le suivi des flux de carbone contenu dans la biomasse est proche de celui obtenu dans le cas des flux d'énergie (Figure 5. 5). La principale différence réside dans le rendement de la synthèse organique, qui est plus élevé puisqu'il correspond à un nombre plus réduit d'opérations. Le rendement de cette production, défini comme le rapport de la production primaire nette à la production primaire brute, est d'environ 25 % [Bonnet et Combarous, 1996 ; Bonnet et Combarous, 2001]. La part utile du flux annuel de carbone capté par les écosystèmes est donc relativement faible.

b) Flux externes

En ce qui concerne les flux de carbone externes, les coefficients spécifiques d'émissions pour chaque opération unitaire sont les mêmes que ceux utilisés précédemment, dans les cas I et II.

Du fait du grand nombre de produits différents issus des productions de pin maritime en Aquitaine, les flux d'énergie externe sont également nombreux et de natures différentes. Ils correspondent à l'utilisation d'énergies fossiles (charbon, pétrole ou gaz), d'électricité, de chaleur ou de produits de fort contenu énergétique (huiles de lubrification, engrais, résines...), lors de chacune des opérations unitaires identifiées dans la description du système.

Les flux d'énergie de substitution n'ont été pris en compte que pour le bois énergie, utilisé en remplacement de combustibles fossiles. Il a été supposé que le bois énergie est utilisé en chaudière bois, en remplacement de fioul. Les rendements des chaudières sont estimés à 70 % dans les deux cas. Le PCI du fioul est pris à 41 GJ/t, celui du bois à 18,2 GJ/t et le coefficient d'émissions de carbone relatif au fioul est pris égal à 0,87 t C/tep, soit 0,02 t C/GJ.

5.2.2 Bilans

a) Références choisies pour les bilans

Les bilans sont faits sur les flux annuels d'énergie et de carbone. Le système étudié est en régime permanent, mais une année de référence a été retenue pour les données concernant le bois sur pied et la production biologique correspond à celle de l'inventaire forestier national, soit l'année 2000. La répartition de la production de bois entre les différents produits finis est proportionnelle à celle proposée par Malfait [Malfait et al., 2003].

Les résultats finaux sont exprimés par hectare de forêt du massif dans son entier, et non pas par hectare de forêt dont le bois a été récolté.

Le calcul du stockage annuel net de carbone doit comprendre :

- Le stockage annuel dans l'écosystème sur pied,
- Les émissions annuelles dues à l'utilisation de combustibles fossiles,
- Les émissions annuelles évitées du fait de la substitution du bois énergie,
- Le stockage annuel dans les produits.

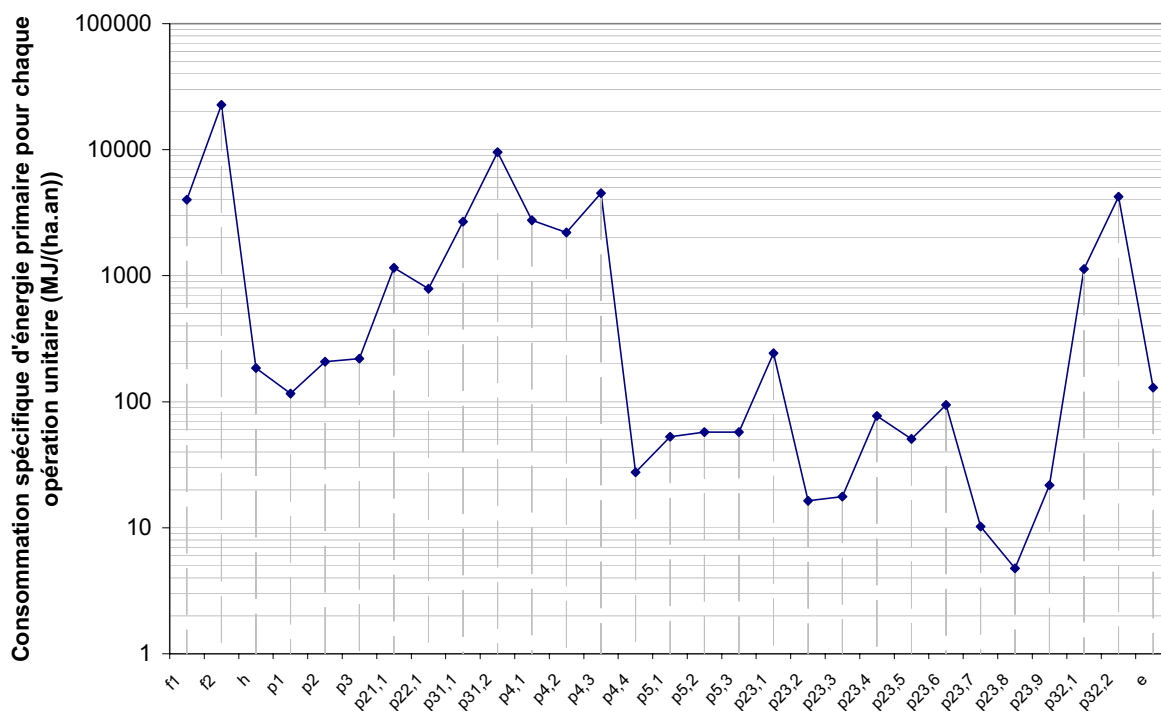


Figure 5. 6 - Consommations spécifiques d'énergie à chaque opération de la filière pin maritime en Aquitaine

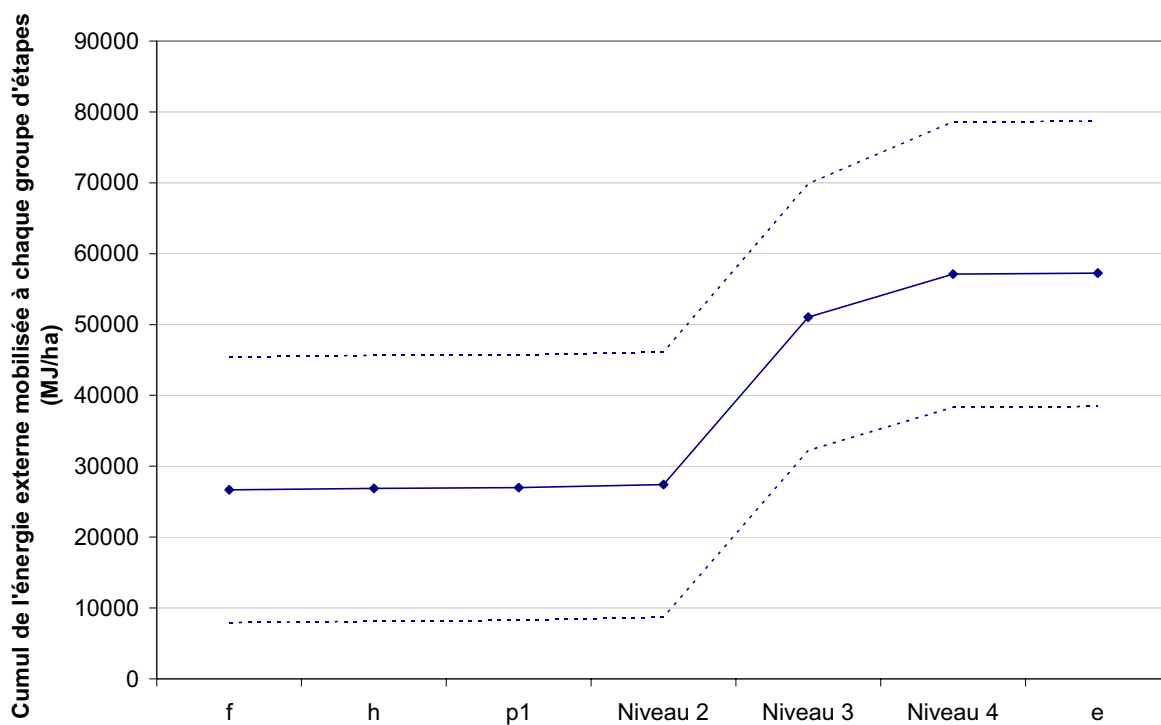


Figure 5. 7 - Cumul des consommations d'énergie au fil de la transformation du pin maritime en Aquitaine. Pour faciliter la lisibilité de la figure, certaines opérations, correspondant à un même niveau de transformation du bois, ont été regroupées. Ainsi, les opérations p₂ et p₃ sont agrégées au niveau 2, les opérations p_{21,1}, p_{22,1}, p_{31,1}, p_{31,2} et p_{4,1}, p_{4,2} et p_{4,3} sont agrégées au niveau 3 et enfin le niveau 4 regroupe les opérations p_{4,4}, p_{5,1}, p_{5,3}, p_{32,1}, p_{32,2} et p_{23,1} à p_{23,9}.

La totalité du flux de carbone passant dans les produits finis ne constitue pas un flux de stockage à proprement parler. Pour définir le flux de stockage correspondant aux produits du bois, il convient de prendre en compte une durée de référence, arbitraire, extérieure au système et indépendante des différents phénomènes, relativement à laquelle le flux de produit sera pris en compte. Cette durée de référence, ou durée d'observation, peut être soit la durée d'un projet, et dans ce cas la pondération donnera plus d'importance aux produits à durée de vie courte, soit un horizon temporel lointain, soit encore une durée fixée par rapport à une quantité objective telle que la durée de vie maximale théorique du produit à plus longue durée de vie.

La durée de référence retenue ici sera l'horizon temporel de 100 ans. La durée de vie moyenne, définie comme la moyenne des durées de vie de chaque produit pondérées par le flux annuel, est égale par ailleurs à 18,9 ans. La prise en compte du flux de produits dans le flux annuel de stockage se fait donc selon la formule suivante :

$$\Gamma_{\text{produits, total}} \text{ (t C/(ha.an))} = (18,9/100) \cdot \Gamma_{\text{produits, annuel}} \text{ (t C/(ha.an))} \quad (5.4)$$

b) Bilans d'énergie

Les bilans d'énergie spécifique externe montrent que les différents produits mobilisent pour leur transformation des quantités très variées d'énergie externe (Figure 5. 6). En ce qui concerne les consommations d'énergie pour la transformation en produits finis, ce sont les produits d'ameublement, de construction et de sciages en général qui utilisent le moins d'énergie, à la fois en valeur absolue sur toute la production, et en valeur unitaire par quantité de bois transformé. À l'inverse, les productions de pâte, papier, carton et panneaux de fibres et de particules sont très consommatrices d'énergie.

Trois scénarios sont comparés [Figure 5. 7], pour tenir compte de différentes situations d'utilisation de l'énergie :

- le scénario bas décrit le cas où la plantation se fait sans apport d'engrais, avec un travail du sol minimum avant plantation, et sans filets de protection des jeunes plants,
- le scénario moyen tient compte en plus de l'utilisation de filets de protection,
- le scénario haut tient compte également de l'utilisation d'engrais et de phytosanitaires [ADEME/DERF, 1998].

Ainsi, entre les trois scénarios, c'est la phase de sylviculture qui varie essentiellement. Le groupe d'étapes qui consomme le plus d'énergie correspond à la première transformation du bois (opérations du niveau 3), notamment en ce qui concerne la trituration. Cette consommation d'énergie s'élève en moyenne à 24 GJ/(ha.an), soit 0,57 tep/(ha.an), ce qui représente 41 % de la totalité de l'énergie mobilisée dans le massif pour la production actuelle de produits en pin maritime, dans un scénario moyen (Figure 5. 10). Les opérations de séchage, contenues dans la phase de deuxième transformation, et relatives par hypothèse seulement aux sciages, ne contribuent pas, sur l'ensemble du massif, à une grande part de la consommation d'énergie, en comparaison de l'énergie mobilisée pour les transformations du bois de trituration. Cela est évidemment lié aux masses de bois utilisées respectivement dans les différentes filières.

Enfin, une certaine quantité d'énergie est produite lors de l'utilisation d'une partie de la récolte sous forme d'énergie. Elle correspond à environ $25 \cdot 10^3$ tep/an ou encore 0,03 tep/(ha.an). Ainsi, le bilan net d'énergie consommée par la filière, en tenant compte de la valorisation d'une partie du bois récolté, s'élève à 1,33 tep/(ha.an) en moyenne, et est comprise entre 0,89 tep/(ha.an) au minimum et 1,84 tep/(ha.an) au maximum.

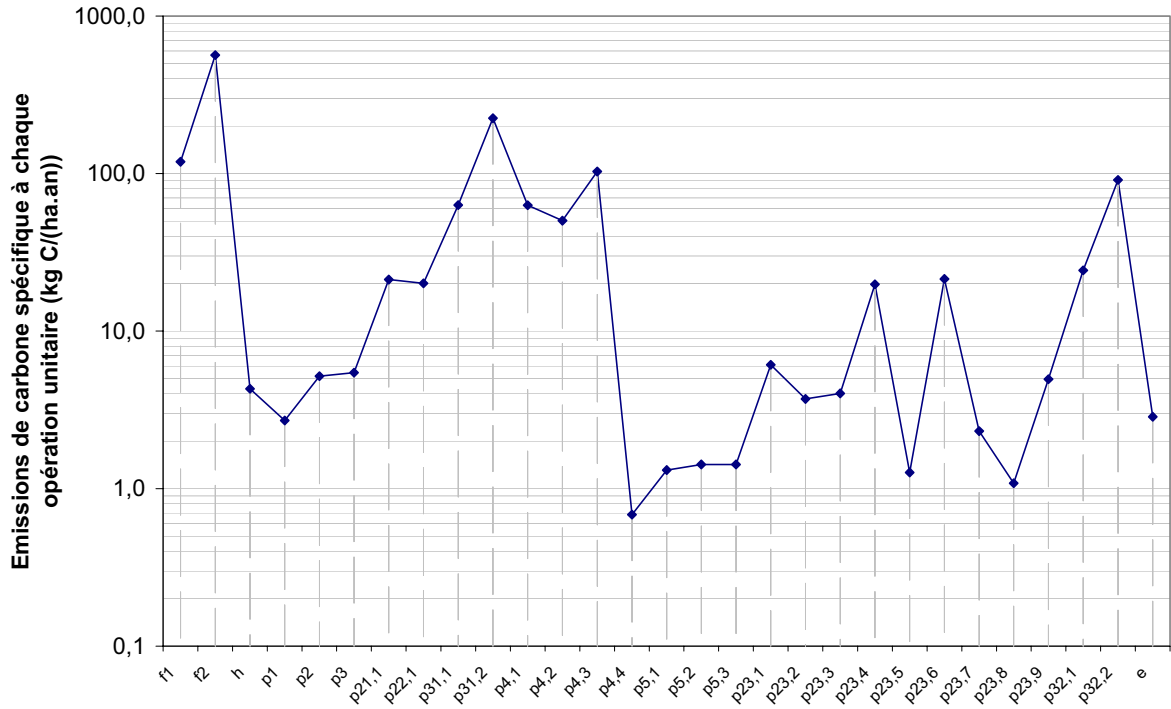


Figure 5.8 - Émissions spécifiques de carbone à chaque opération de la filière pin maritime en Aquitaine

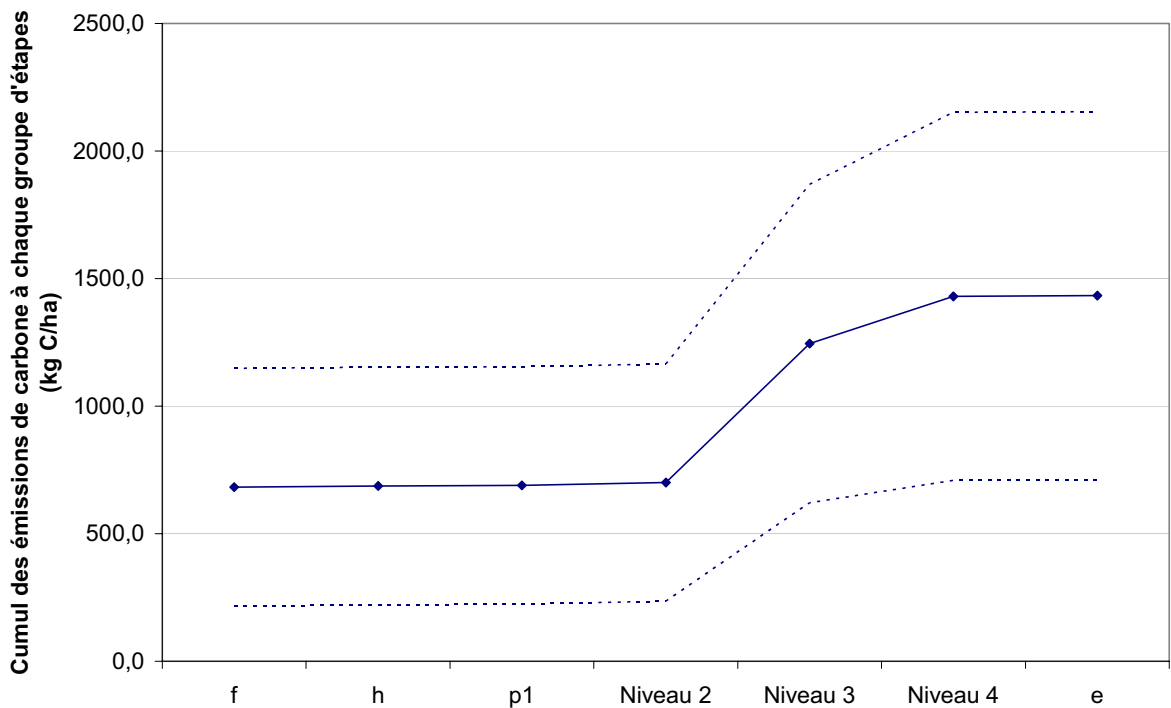


Figure 5.9 - Cumul des émissions de carbone au fil de la transformation du pin maritime en Aquitaine.

Pour faciliter la lisibilité de la figure, certaines opérations, correspondant à un même niveau de transformation du bois, ont été regroupées. Ainsi, les opérations p2 et p3 sont agrégées au niveau 2, les opérations p21,1, p22,1, p31,1, p31,2 et p4,1, p4,2 et p4,3 sont agrégées au niveau 3 et enfin le niveau 4 regroupe les opérations p4,4, p5,1, p5,3, p32,1, p32,2 et p23,1 à p23,9.

c) Bilans de carbone

Le type d'énergie pour chacune des transformations est relativement semblable, ce qui se traduit par le fait que la représentation des émissions spécifiques de carbone a la même allure que celle des consommations spécifiques d'énergie (Figure 5. 8), en-dehors des opérations incluant des phases de séchage du bois, qui se traduisent par des pics d'émissions de carbone. Cela tient bien sûr aux hypothèses de répartition des types d'énergie pour une même opération entre énergie électrique, carburant, et autres consommations directes ou indirectes d'énergie.

Le groupe d'étapes qui émet le plus de carbone dans la filière pin maritime en Aquitaine correspond à la première transformation (opérations du niveau 3), en lien étroit avec les résultats obtenus pour les consommations d'énergie, et ce malgré les émissions importantes dues au séchage. Les émissions de carbone correspondant à ces étapes s'élèvent en moyenne à 535 kg C/(ha.an), ce qui représente environ 40 % de la totalité des émissions liées à la fabrication de produits en bois de pin maritime, en excluant la contribution des phases de transport du bois entre les différentes transformations.

Dans le scénario de référence retenu, les produits sont mis en décharge en fin de vie. Il convient donc de tenir compte d'un flux d'émissions de carbone vers l'atmosphère, correspondant à la part réémise lors de la dégradation du bois en décharge. Elle est estimée à 45 g C/kg de bois mis en décharge [Bucket, 2004].

Le bilan net de carbone sur toute la filière, en tenant compte à la fois des émissions fossiles, de la substitution du bois énergie, du stockage dans la biomasse sur pied et dans les produits, montre un stockage net compris entre 0,2 et 1,7 t C/(ha.an).

d) Une caractéristique essentielle des systèmes en régime permanent

S'il est une évidence en génie des procédés, c'est bien le fait que pour un système en régime permanent, dont en particulier les entrées et sorties sont constantes, le stock reste constant. À l'examen du cas III, en considérant le stock constitué par l'ensemble de la forêt sur pied et des produits, affirmer que le régime est permanent sous-entend que ce système n'est pas en mesure de prélever de l'atmosphère la moindre molécule de carbone supplémentaire. C'est assez dire que l'analyse d'un cas comme celui qui est étudié ici est importante non pas tant par les flux mis en jeu, mais par les élasticités qu'elle permet d'apprécier.

Les caractéristiques en termes de stockage de carbone et de consommation d'énergie externe sont consignées dans le Tableau 5. 4, qui reprend les valeurs relatives au scénario moyen.

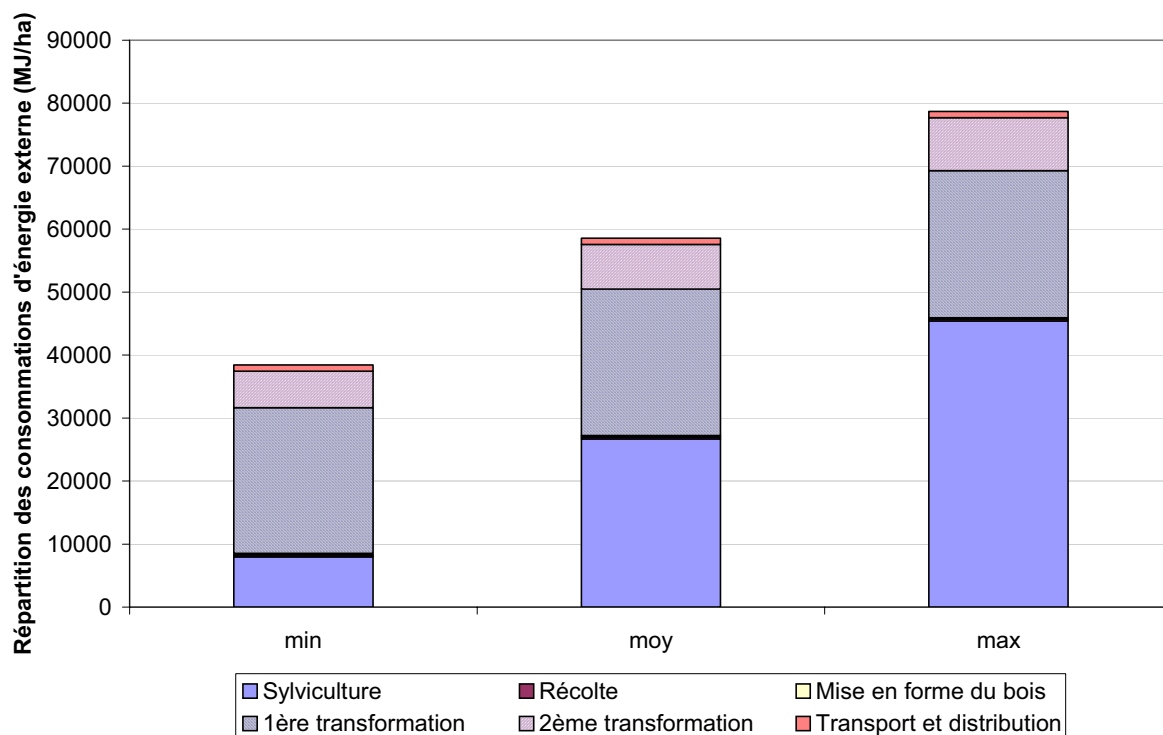


Figure 5. 10 - Répartition des consommations d'énergie primaire externe dans la filière pin maritime en Aquitaine, entre les différentes phases de transformation du bois

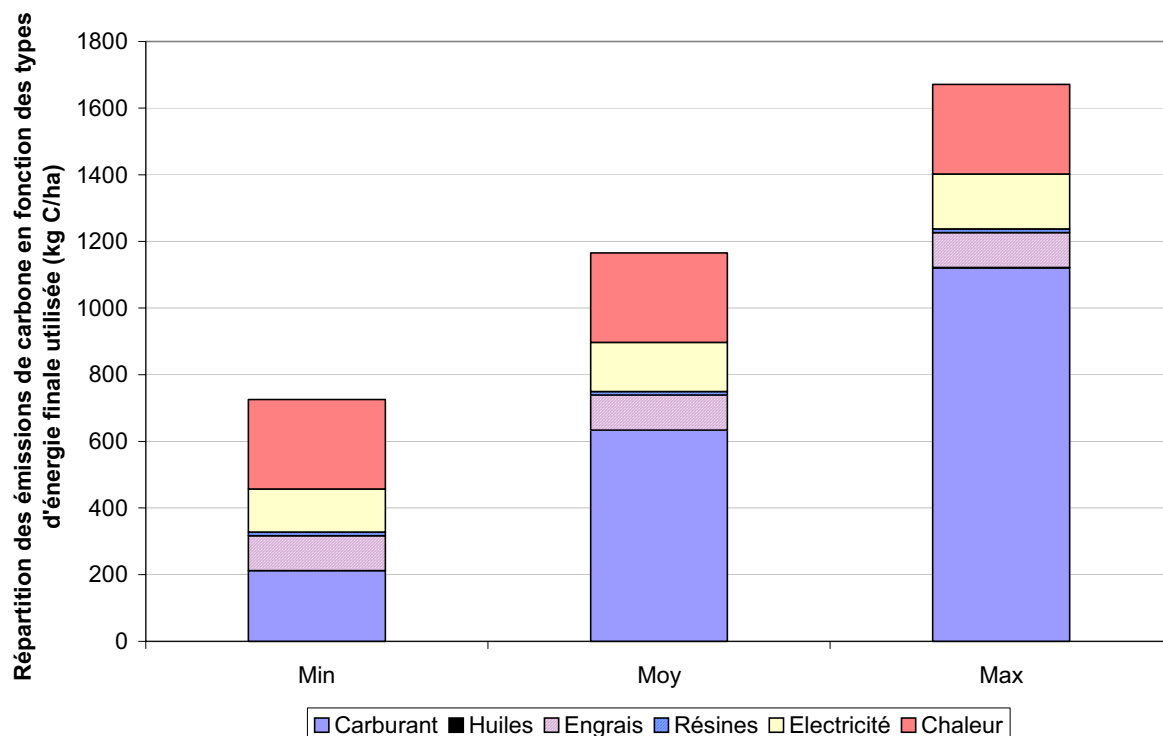


Figure 5. 11 - Répartition des émissions de carbone externes dans la filière pin maritime en Aquitaine, entre les différentes sources d'énergie utilisées

5.3 ÉTUDES DE SENSIBILITÉ ET CALCUL D'INCERTITUDES

5.3.1 Durée de vie des produits

Les durées de vie des produits du bois sont assez mal connues, sauf pour certains produits très particuliers comme les palettes, lorsqu'elles sont normalisées. Il est donc indispensable de faire une étude de sensibilité du stockage à ces durées de vie. Les grandeurs qui sont directement liées à ces durées de vie sont, bien sûr, le stockage dans les produits eux-mêmes, mais aussi les émissions annuelles dues à la fin de vie des produits en décharge.

La forme retenue pour la modélisation de la durée de vie des produits peut être, pour une ligne de produits donnée, soit une durée fixe, au bout de laquelle tous les produits d'une même ligne ont disparu, soit une loi de décroissance exponentielle, soit une loi de distribution des durées de vie, de type normale ou log-normale. Dans de nombreux cas, la répartition entre les catégories de produits finis identifiées ici n'est pas faite, la préférence étant donnée à des catégories plus agrégées, du type produits à durée de vie courte, moyenne ou longue.

Ce paramètre étant à l'heure actuelle mal connu, c'est le plus souvent une durée de vie fixe qui est retenue. Il est cependant intéressant de mener tout à la fois une étude de sensibilité sur la valeur de la durée de vie et sur la forme de sa modélisation. Cette démarche serait même indispensable dès lors qu'un projet serait mené pour modifier tel ou tel équilibre en changeant les flux, les durées de vie des produits...

Avec les durées de vie retenues dans un premier temps pour les calculs, la filière bois de pin maritime en Aquitaine pourrait stocker dans les seuls produits le carbone pendant presque 19 années, ce qui représente une durée de stockage équivalente à celle du stockage sur pied, compte tenu de la durée moyenne de rotation du peuplement, qui se situe à environ 35 ans. En faisant varier dans les mêmes proportions toutes les durées de vie, il est possible d'estimer une première élasticité du système. Les sensibilités sont directement proportionnelles aux flux de produits considérés : ainsi, une catégorie de produits à longue durée de vie mais dont le flux annuel est modeste peut avoir une influence sur le stockage globale qui est du même ordre de grandeur qu'une catégorie de produits dont la durée de vie est courte, mais le flux annuel important. La différence entre les deux catégories de produits se fera sur la référence choisie pour la période de référence.

En faisant varier la durée de vie des produits entre 20 % et 200 % de la durée de vie nominale, il apparaît que :

- l'influence de ce paramètre sur les émissions de carbone liées à la consommation d'énergie fossile est négligeable, qui varie de 2 % à 0 % quand la durée de vie passe de 0,2·d à 2·d,
- la sensibilité du stockage dans les produits est directement proportionnelle à la durée de vie, par définition, et dépend également de la durée de référence choisie (ici 100 ans),
- le stockage total de carbone évolue selon une droite de même pente que le stockage dans les produits, mais la sensibilité à la durée de vie est atténuée par les effets des émissions fossiles et du stockage dans la biomasse.

Tableau 5. 1 - Répartition des surfaces de pin maritime par classes d'âge et stockage résultant.

Classe d'âge	Surface Mha	Stock t C/ha	PPN t C/(ha.an)	Flux de stockage t C/(ha.an)
0-5	0,05	0,69	0,53	0,53
5-10	0,11	5,88	1,53	1,53
10-15	0,08	15,67	2,36	2,36
15-20	0,05	29,02	2,94	2,94
20-25	0,08	44,60	3,24	3,24
25-30	0,07	60,99	3,27	3,27
30-35	0,07	76,94	3,07	3,07
35-40	0,05	91,46	2,71	2,71
40-45	0,07	103,93	2,26	2,26
45-50	0,07	114,06	1,79	1,79
50-55	0,05	121,90	1,35	1,35
55-60	0,05	127,67	0,97	0,97
60-65	0,01	131,74	0,67	0,67
65-70	0,01	134,47	0,44	0,44
70-75	0,01	136,22	0,27	0,27
75-80	0,01	137,31	0,17	0,17
> 80	0,01	138,63	0,01	0,01
Total	0,85	55,7 Mt C	1,78 Mt C/an	1,78 Mt C/an

Tableau 5. 2 - Type de modèle et valeurs utilisées pour les durées de vie des produits du bois selon diverses sources. Dans les travaux indiqués par une astérisque, la répartition n'est pas explicite par type de produit, mais a été adaptée pour les besoins de la présente étude.

Source	Loi	Énergie	Construction	Ameublement	Emballage	Papier et carton
Buchanan et Levine, 1999	Échelon	1	40	40	40	3
CTBA, 2003	Échelon	2	40	20	7	2
Thompson et Matthews, 1989	Exponentielle	1 (8)	70 à 150 (150 à 300)	15 (40)	1 à 2 (4 à 5)	1 (5)
Pingoud et al., 2001	Exponentielle	-	40	-	-	-
Börjesson et Gustavsson, 2000	Échelon	-	50 à 100	-	-	-
Kohlmaier et al., 1998	Échelon	-	30 à 50	-	-	-
Marland et Marland, 2003	Exponentielle	1	100	20	10	5
Valeurs retenues	Échelon	1	40	20	7	2

5.3.2 Fin de vie des produits

La fin de vie des produits du bois a un effet important sur le bilan global d'énergie et de carbone, notamment du fait de la substitution éventuelle des produits en fin de vie aux énergies fossiles ou à d'autres usages, comme cela peut éventuellement le cas pour les produits issus de la trituration. Les fins de vie possibles pour les produits sont soit la mise en décharge, soit la valorisation énergétique, soit encore éventuellement la valorisation en bois de trituration. Dans le cas de la mise en décharge, il peut être supposé qu'il s'agit d'un enfouissement technique en décharge de niveau 2. La valorisation énergétique n'a de sens qu'en substitution à des énergies fossiles carbonées (charbon, pétrole ou gaz), quel que soit le type d'énergie produite. La valorisation sera d'autant plus intéressante que le combustible fossile remplacé est fortement carboné et que le rapport du rendement de l'installation au bois au rendement de l'installation utilisant l'énergie fossile est grand.

a) Valorisation énergétique

La valorisation énergétique exerce son influence sur le bilan des émissions de carbone à l'étape de fin de vie (étape e). Elle n'a donc a priori d'influence que sur le bilan d'émissions de carbone fossile et sur le bilan global. Pour cette étude de sensibilité, il sera supposé que le bois vient en substitution de fioul, utilisé pour la production de chaleur. Dans ces conditions, si tout le bois contenu dans les produits est valorisé en fin de vie, le bilan des émissions externes de carbone sur la seule étape de fin de vie passe de 69 à 26 kg C/(ha.an), ce qui correspond à une augmentation du stockage annuel total de carbone de 5 % environ.

b) Valorisation sous forme de bois de trituration

Un autre mode de valorisation envisageable est celui de la trituration. Cette fin de vie possible influe sur plusieurs points différents :

- Elle augmente la quantité de bois de trituration, donc la quantité d'énergie mobilisée pour sa transformation,
- Dans un deuxième temps, elle augmente le flux annuel de produits et donc le stock de carbone contenu dans les produits.

Dans cette simulation, il est donc supposé que tous les produits en fin de vie sont réutilisés au niveau des produits connexes (Figure 5. 3), c'est-à-dire qu'ils sont réutilisés pour la production de panneaux de bois et de papier et cartons. La répartition entre les divers produits se fait proportionnellement à celle qui caractérise la situation actuelle, soit 24,5 % de la masse de bois pour les panneaux de particules, 30 % pour les panneaux mélaminés, 11,5 % pour les autres panneaux, et 34 % pour les pâtes, dont 73 % pour les pâtes chimiques écruées et 27 % pour les pâtes chimiques blanches spéciales.

En conservant une répartition proportionnelle à celle déjà existante pour l'utilisation des produits connexes, la quantité de panneaux fabriquée est augmentée de 10 %, de même que la quantité de planchers et agencements, ou d'ameublement issus de panneaux, la quantité de pâte chimie écruée est augmentée de 11 %, ainsi que la quantité de papier kraft et emballage, et la quantité de pâtes chimiques blanches spéciales est augmentée de 15 %, et par conséquent la production de papier industriel augmente dans les mêmes proportions. La quantité de palettes et d'emballages n'augmente quant à elle que de 1 %, dans la mesure où elle est alimentée principalement par les sciages.

Tableau 5. 3 - Bilan des consommations d'énergie externe pour le cas III. Pour les opérations f, h et p₁, les valeurs unitaires sont identiques à celles du chapitre 4. Les noms des opérations sont consignés dans la nomenclature.

Opération	Énergie externe, e_i en MJ/U	Type d'énergie finale	Rendement matière, ε_i	Unité de référence, U
p_2	68	Carburant : 100 %	0,73	t bois transporté
p_3	68	Carburant : 100 %	0,77	t bois transporté
$p_{21,1}$	118	Électricité : 22,5 % Gaz (butane) : 31 % Carburant : 1,5 % Résine : 45 %	[0,43-0,47]	m ² de contreplaqué
$p_{22,1}$	407	Électricité : 88 % Carburant : 8 % Huiles : 4 %	[0,47-0,53]	m ³ de sciages
$p_{31,1}$	25200	Électricité : 43 %	0,35	t de pâte
$p_{31,2}$		Vapeur : 57 %	0,31	
$p_{4,1}$	3175	Électricité : 41 %	0,64	m ³ de panneau
$p_{4,2}$		Énergie thermique : 53,5 %		
$p_{4,3}$	8255	Revêtement : 5,5 %	[0,51-0,70]	
$p_{4,4}$	82	Carburant : 100 %	1	t de bois énergie
$p_{5,1}$	82	Carburant : 100 %	1	t d'écorce
$p_{5,2}$				
$p_{5,3}$				
$p_{23,1}$	200	Électricité : 87 % Carburant : 12 % Huiles : 1 %	0,6	m ³ bois transformé
$p_{23,2}$				
$p_{23,3}$			0,65	
$p_{23,4}$			0,84	
$p_{23,5}$	1		[0,8-0,9]	m ² de panneau
$p_{23,6}$	200		0,63	m ³ bois transformé
$p_{23,7}$			0,75	
$p_{23,8}$			0,7	
$p_{23,9}$			0,8	
$p_{32,1}$			11880	
$p_{32,2}$	Carburant : 45 %			

Les émissions externe de carbone dues à la consommation d'énergies fossiles sont alors augmentées de 5 %, tandis que le stock de carbone est modifié dans les produits, puisque la durée de vie passe de 18,9 à 19,1 ans, le flux annuel de produits passant dans le même temps de 2,71 Mt/an à 2,85 Mt/an. Finalement, l'impact net de la valorisation des produits en fin de vie sous forme de bois de trituration est d'une ampleur relativement faible, puisque l'augmentation des émissions fossiles est compensée par l'augmentation induite du flux de produits, qui s'annulent donc.

Le bilan est très favorable au cas limite où tous les déchets de transformation du bois sont valorisés sous forme d'énergie plutôt que d'être utilisés dans la filière trituration, cela pour deux raisons : tout d'abord, cette valorisation a pour effet direct de diminuer fortement la consommation d'énergie dans la filière, puisque l'utilisation du bois pour la trituration mobilise les opérations les plus coûteuses en énergie, et ensuite, la substitution du bois permet d'éviter une grande quantité d'émissions de carbone.

Le cas de la mise en décharge est plus délicat à traiter. Tout d'abord, il convient de tenir compte d'un taux d'émissions de méthane éventuellement émis lors de la décomposition de la matière organique. Par ailleurs, l'enfouissement technique peut être considéré comme un stock au même titre que les autres produits du bois, en particulier les produits à longue durée de vie. La comparaison avec les autres fins de vie n'est donc pas triviale, au contraire du cas de la valorisation bois énergie qui est intuitivement la plus intéressante.

Dans le cas de la trituration, il est délicat de tenir compte d'un éventuel effet de substitution, du fait de la grande variété des produits et de leurs caractéristiques (résistance mécanique, ...) qui feraient qu'une substitution serait possible avec des matériaux tels que l'aluminium ou l'acier. Il est possible toutefois d'avancer un calcul, sur la base d'études proposées par ailleurs.

5.3.3 Répartition des utilisations des productions

Compte tenu de la remarque précédente, dans une logique d'augmentation de l'aptitude au stockage, il est particulièrement important d'apprécier l'élasticité du système à une redistribution des usages du bois dans les différents produits. L'estimation du stockage de carbone dans une filière bois complète peut être complétée par un calcul des effets potentiels d'une redistribution des utilisations du bois dans la filière sur le stockage total. Moyennant certaines hypothèses sur les valeurs maximales atteignables pour chacun des usages, du fait de la qualité du bois, il est possible de déterminer une répartition optimale des produits, vis-à-vis du seul critère de stockage de carbone.

De même, une étude de sensibilité peut être faite sur l'usage des déchets de transformation du bois. Dans la filière d'utilisation du pin maritime telle qu'elle est décrite ici, une grande majorité des déchets de transformation est valorisée dans la filière trituration : il y a lieu de quantifier l'effet de la valorisation de ces déchets en énergie, éventuellement compensée par la production de plus de bois de trituration.

Compte tenu du grand nombre de configurations possibles, un seul déplacement d'équilibre est envisagé ici. Il est donc supposé dans ce scénario :

- que les déchets de transformation sont valorisés sous forme d'énergie au lieu de la fabrication de panneaux de bois ou de papier,
- que les sciages de la catégorie « autres sciages » sont utilisés pour la construction,
- que la moitié des sciages utilisés pour la fabrication de palettes est affectée à la fabrication de charpente.

Tableau 5. 4 - Bilan des indicateurs pour le cas III.

Intitulé	Unité	Caractéristiques de stockage annuelles	Unité	Cumul de C sur 100 ans
$E_{fossile, total}$	tep/(ha.an)	[0,9-1,9]		
$\Gamma_{fossile, total}$	t C/(ha.an)	[0,7-2,2]	t C/ha	[70-220]
$\Gamma_{biomasse, total}$	t C/(ha.an)	2	t C/ha	200
$\Gamma_{substitution, total}$	t C/(ha.an)	0,06	t C/ha	6
$\Gamma_{produits, total}$	t C/(ha.an)	0,3	t C/ha	30
$\Gamma_{stocké, total}$	t C/(ha.an)	[0,2-1,7]	t C/ha	[16-166]

Ce scénario est bien sûr particulièrement optimiste et vise à estimer un ordre de grandeur réaliste de l'élasticité du système. Il améliore de 7 % le bilan net entre les énergies fossiles et la substitution du bois énergie.

5.3.4 Calcul d'incertitudes

Le calcul d'incertitudes s'avère une fois encore délicat du fait du grand nombre de paramètres intervenant dans le bilan :

- Densité et facteur d'expansion de la biomasse sur pied,
- Consommations spécifiques d'énergie externe,
- Coefficients spécifiques d'émissions de carbone,
- Rendements matière des différentes opérations,
- Masses volumiques des produits aux divers stades de transformation,
- Distances de transport...

De même que précédemment, il convient d'utiliser une approche probabiliste pour calculer la propagation des incertitudes dans le bilan net de carbone du système décrivant la filière complète.

Les données des consommations spécifiques d'énergie sont relativement incertaines, dans la mesure notamment où elles sont souvent issues de données bibliographiques différentes. Cependant, il est difficile d'en estimer les incertitudes. Par ailleurs les données de consommation d'énergie issues d'analyses de cycle de vie sont généralement relatives à des consommations d'énergie non renouvelables, ce qui rend difficile la comparaison entre toutes les données, dans la mesure où la quantité d'énergie totale utilisée pour une opération peut ne pas être connue. Faute de données complémentaires, c'est donc une plage de variations, sous la forme des trois scénarios de consommation d'énergie, qui est retenue ici.

Comme dans le chapitre 4, c'est donc sur les coefficients spécifiques d'émissions que porte le calcul d'incertitude. Dans la mesure où les consommations de matières non énergétiques (engrais, filets, huiles et résines) représentent une faible proportion du total de l'énergie externe consommée, leur influence sur l'incertitude globale est relativement faible. En moyenne, les émissions de carbone fossile s'élèvent donc sur tout le massif à $1637 \text{ kg C}/(\text{ha.an}) \pm 6 \%$, puisque la forme obtenue pour la répartition de ces émissions est une distribution normale.

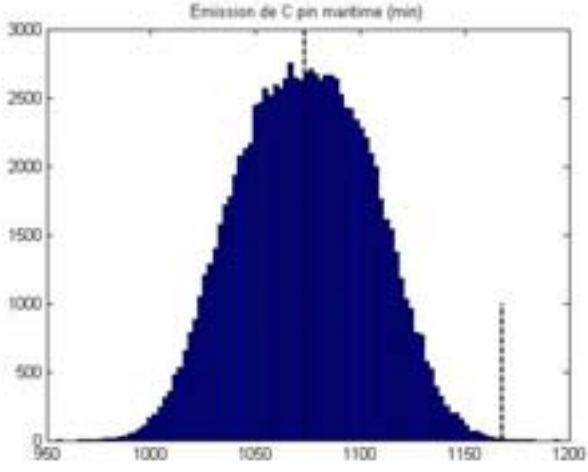
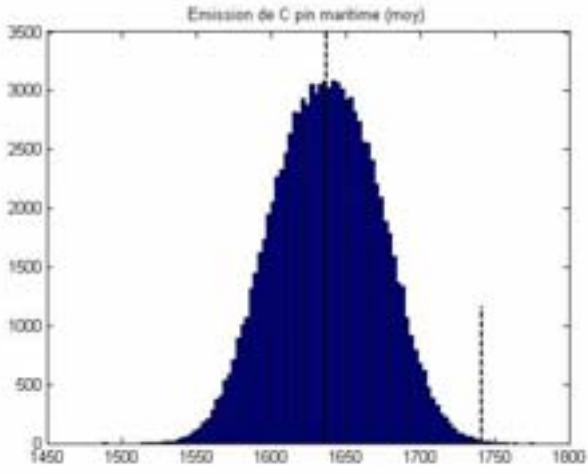
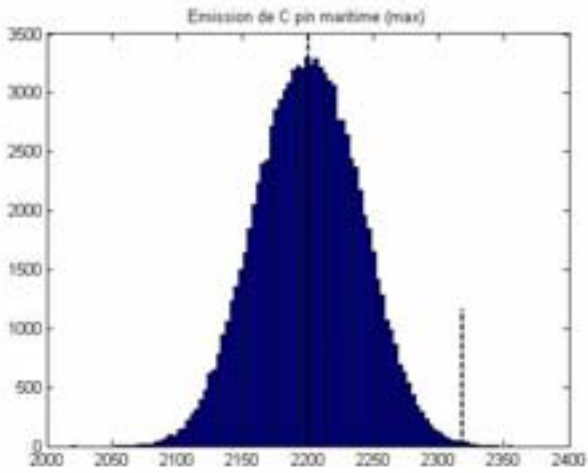
5.4 ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION

5.4.1 Paramètres pertinents, goulots d'étranglement

Les paramètres pertinents pour l'évaluation du stockage de carbone à l'échelle régionale, dans une filière complète déjà existante, sont donc les suivants :

- la répartition entre les utilisations,
- la quantité de bois récoltée chaque année,
- la valorisation ou non des déchets du bois,
- et la fin de vie des produits du bois.

Tableau 5. 5 - Résultats des calculs de propagation d'incertitudes sur le total des émissions de carbone fossile dans le massif forestier des Landes d'Aquitaine. Les émissions sont cumulées de la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

	Moyenne en kg C/(ha.an)	Écart-type en kg C/(ha.an)
 <p>Emission de C pin maritime (min)</p>	1073	31
 <p>Emission de C pin maritime (moy)</p>	1637	34
 <p>Emission de C pin maritime (max)</p>	2200	39

Les produits dont la fabrication est la plus émettrice en carbone sont les produits des filières trituration, qu'il s'agisse de papier et carton ou de panneaux de bois. Par ailleurs, ces filières présentent également l'inconvénient de fabriquer des produits dont la durée de vie est moins longue que les sciages par exemple.

En l'état actuel du peuplement des Landes d'Aquitaine et de la filière bois en aval de la forêt, le carbone est stocké pendant environ 21 ans, compte tenu de la durée de rotation d'environ 25 ans, et dans les produits, en fonction des durées de vie retenues, pour une durée de 19 ans environ. Par ailleurs, un bilan net des différents flux de carbone identifiés permet d'aboutir à un stockage de carbone compris entre 0,2 et 1,7 t C/(ha.an), selon les caractéristiques des consommations spécifiques d'énergie pour chaque opération de transformation.

5.4.2 Potentiel à grande échelle

Deux points de vue sont possibles pour estimer le potentiel de stockage de carbone à l'échelle mondiale en incluant les produits de la filière bois : celui de la ressource, c'est-à-dire l'offre et celui de la demande. Le calcul proposé ici se place du point de vue de la ressource disponible et du potentiel maximal de stockage de carbone dans l'hypothèse où la production serait absorbée par le marché du bois.

Le fait d'aborder le problème du point de vue de la ressource met de côté les éventuelles questions de pénétration des produits du bois sur le marché. Lorsqu'une substitution est possible, un taux maximum de pénétration peut être approché en supposant que tout ce qui peut être substitué le sera. Mais bien sûr d'autres paramètres doivent être pris en compte, notamment sur le plan économique et social, ce qui sort du cadre de cette étude.

5.4.3 Modes d'action et marges de manœuvre

Le déplacement d'un équilibre pour permettre de stocker davantage de carbone dans une filière peut se faire selon différents modes d'action :

- augmentation de la production en volume,
- changement de la répartition des produits en favorisant les produits dont la fabrication est peu coûteuse en énergie et dont la durée de vie est longue,
- augmentation de la durée de vie des produits,
- valorisation sous forme d'énergie des produits en fin de vie.

Deux de ces modes ont été envisagés ici : d'une part la valorisation des produits en fin de vie sous forme d'énergie, et d'autre part le changement de répartition des produits. Plusieurs points sont à noter :

- la valorisation du bois sous forme d'énergie permet à coup sûr d'améliorer le bilan net, mais cette amélioration dépend très fortement du combustible substitué,
- l'utilisation des déchets de transformation pour la production d'énergie et non pour la fabrication de panneaux diminue significativement les consommations d'énergie externe et donc les émissions induites de carbone.

La combinaison de ces deux axes de déplacements permettrait de diminuer les émissions fossiles de 7 % si le combustible substitué est du fioul et jusqu'à 30 % dans le cas où le combustible substitué est du charbon. Ces diminutions d'émissions, combinées à une redistribution des produits finis et une variation de leur durée de vie moyenne, induiraient une augmentation du stockage annuel comprise entre 0,6 % et 44 % si le bois énergie est substitué à du charbon.



Le pin maritime (*Pinus pinaster* – *P. maritima*) couvre en France une surface de 1 Mha.

6. APPLICATION DE LA DÉMARCHE À LA PRODUCTION DE BOIS ÉNERGIE

6.1 LE SYSTÈME ET LES CAS ÉTUDIÉS (IV, V, VI ET VII)

6.1.1 Description des modes de production d'énergie à partir du bois

Actuellement, le bois énergie (Figure 6. 2) a une contribution significative dans le bilan énergétique mondial, du même ordre que celle de l'énergie nucléaire ou hydroélectrique. Cette contribution, d'une comptabilité moins stricte que les énergies conventionnelles, n'apparaît généralement pas dans les bilans des énergies primaires à l'échelle globale. L'apport en bois énergie dans les pays en développement peut cependant représenter jusqu'à 80% de l'approvisionnement en énergie des foyers en zone rurale et de 40 % à 80 % du bilan national d'énergie primaire, selon les situations les plus représentatives. Il prend alors la forme de bois de feu, de petit bois et de charbon de bois, ce dernier étant souvent exploité commercialement.

Les autres biomasses utilisées traditionnellement sous forme d'énergie sont dans certains cas importantes : ainsi les déchets animaux sont à l'échelle mondiale source de 150 Mtep/an environ, dont 40 % pour l'Inde seule. La biomasse représentait, en 2000, 62 % de toute l'énergie primaire géothermique et renouvelable, y compris l'hydroélectricité, dans les pays de l'Union Européenne (à 15 pays), soit 53,7 Mtep, dont la majeure partie était issue du bois ou de ses déchets, à hauteur de 83 %, et des déchets solides municipaux pour 13 %, la part des biocarburants et du biogaz étant presque négligeable [Eurostat, 2002]. À l'échelle mondiale encore, c'est bien la biomasse sous forme solide, et notamment le bois et ses dérivés, qui représente la très grande majorité de l'énergie renouvelable issue de la biomasse (Figure 6. 3) : sur un peu moins de 1,1 Gtep/an consommée chaque année, la part des combustibles liquides (biocarburants notamment) s'élève à environ 1 % et celle des combustibles gazeux à moins de 0,4 %.

Deux aspects sont à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'étudier l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie : la forme du combustible et la technologie énergétique utilisée (type d'énergie finale). Comme il l'a été déjà évoqué, le bois énergie est utilisé sous diverses formes (Figure 6. 1) :

- le bois combustible et ses produits (bûches, plaquettes) ainsi que les résidus de récolte,
- les déchets de bois (sciures, copeaux) et leurs produits (granulés, plaquettes),
- les produits de la conversion thermochimique (production de charbon de bois par pyrolyse ou, de façon plus expérimentale, production de biocarburants),
- et les produits de la gazéification.

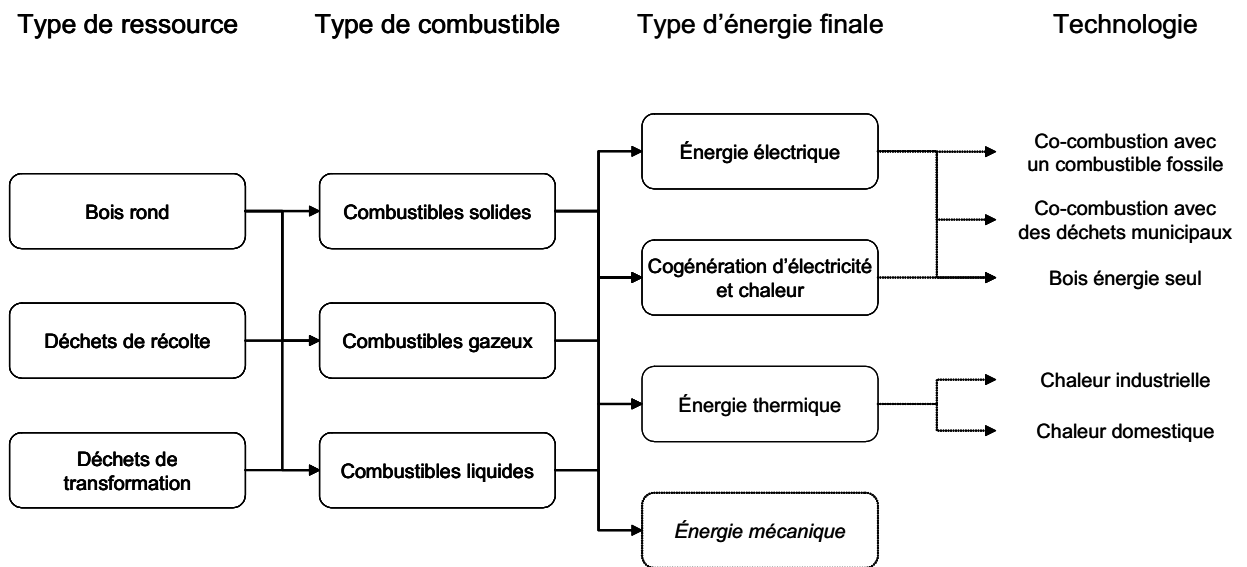


Figure 6. 1 - Les différents modes de production d'énergie à partir du bois

Les technologies énergétiques diffèrent selon les usages, individuels, collectifs ou industriels, et selon la forme d'énergie utilisée (chaleur, électricité). Il est ainsi possible de distinguer les catégories suivantes, depuis les dispositifs de plus petite ampleur jusqu'aux grandes installations de production d'énergie :

- foyers individuels ouverts ou fermés,
- chaudières individuelles,
- chaudières de chaufferies collectives et industrielles,
- centrales de production d'électricité et de cogénération.

Toutes ces technologies ont bien sûr des caractéristiques et des rendements différents, souvent très dispersés dans chacune des catégories distinguées. Ainsi, les chaudières de chauffage central, dans l'habitat collectif et le tertiaire, ont des rendements qui varient entre 60 et 75 %, les foyers ouverts ont un rendement faible, généralement de l'ordre de 15 %, alors que les rendements des foyers fermés ou poêles se situent entre 50 et 60 %, tout comme les équipements tels que les cuisinières. En ce qui concerne les centrales, les rendements peuvent être plus élevés : certaines centrales alimentant des réseaux de chaleur ont une rentabilité qui peut varier de 70-90% à 110 %, sur la base du PCS (pouvoir calorifique supérieur) du combustible (installations comportant des turbines à condensation) ; les centrales de cogénération, utilisées dans l'industrie ou bien raccordées à un réseau de chaleur, atteignent quant à elles des efficacités de l'ordre 80 à 90 % ; les centrales de production d'électricité enfin ont des rendements variant de 35 à 45 % [CLIP, 1998]. L'amélioration des technologies pourra permettre, à moyen terme, d'augmenter certains de ces rendements, notamment en ce qui concerne les équipements individuels.

Les situations actuellement les plus répandues concernent :

- le chauffage individuel à combustibles traditionnels, en foyers ouverts ou fermés : il représente un peu moins de 8 Mtep/an en France, et environ 23 Mtep/an dans l'Union Européenne (avec l'élargissement à 25 pays cette consommation s'établit à environ 30 Mtep/an),
- le chauffage collectif, alimentant ou non un réseau de chaleur, et la chaleur industrielle à base de produits et déchets de bois,
- dans une moindre mesure, la production d'électricité avec ou sans récupération de la chaleur résiduelle : en Finlande, près de 10 % de l'électricité provient de l'utilisation du bois, très majoritairement en cogénération (données IEA pour l'année 2001).

Le bois énergie est souvent considéré comme une source locale d'énergie, mais peut se révéler compétitif vis-à-vis des autres sources, du fait du grand nombre de sites dispersés potentiellement exploitables. Les conditions d'exploitation tiennent alors compte des besoins locaux, du potentiel de production à une distance économiquement acceptable (inférieure par exemple à 100 km). Les avantages du bois énergie (faible coût du combustible et bilan carbone avantageux notamment) doivent alors compenser les inconvénients (coût d'investissement élevé, contraintes et coût de maintenance).

Contrairement aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), le bois énergie, quand la biomasse est renouvelée en forêt, peut en première approche être considéré au moins comme neutre vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre. Il permet donc, lorsqu'on y a recours en substitution aux combustibles fossiles, de préserver les ressources non renouvelables d'énergie, et d'éviter les injections de CO₂ dans l'atmosphère. Cette idée, participant des principes de précaution déjà évoqués, est développée au travers des différentes études de cas retenues dans ce chapitre.

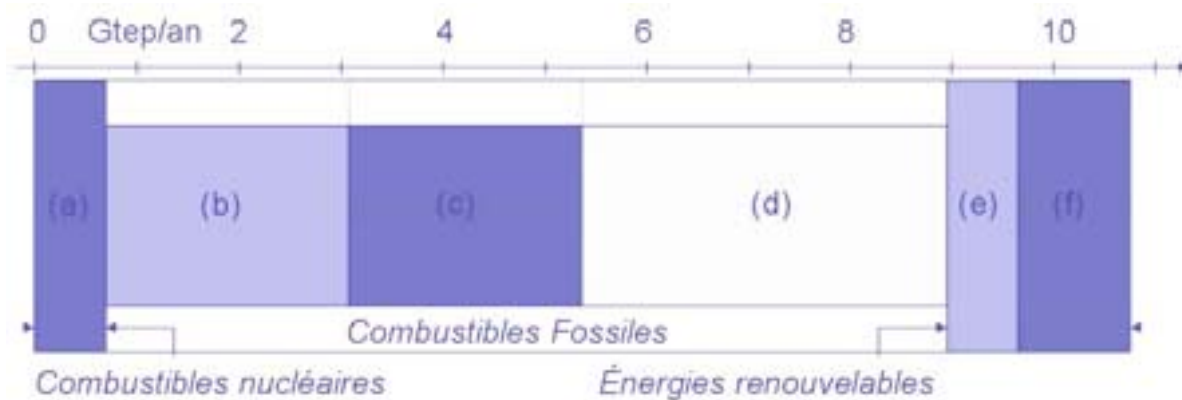


Figure 6. 2 - Répartition des consommations annuelles d'énergie dans le monde : (a) nucléaire, (b) charbon, (c) gaz naturel, (d) pétrole, (e) hydraulique, (f) biomasse. D'après les statistiques BP pour l'année 2004.

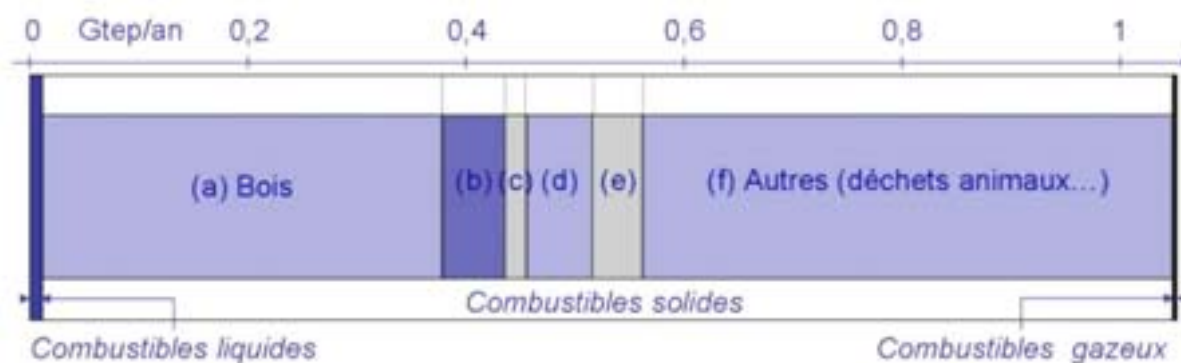


Figure 6. 3 - Répartition des consommations annuelles d'énergie issue de la biomasse dans le monde : combustibles liquides, combustibles solides [(a) bois, (b) charbon de bois, (d) résidus de bois, (e) liqueur noire, (f) bagasse], et combustibles gazeux. D'après les données du WRI et de la FAO pour l'année 2000.

6.1.2 Les quatre cas retenus pour cette étude (cas IV, cas V, cas VI et cas VII)

Les modes de production d'énergie à partir du bois étant très divers, il s'agit de les comparer et de mettre en évidence les facteurs limitants et les marges de manœuvre pour chaque type de technologie vis-à-vis des bilans d'énergie et de carbone. Les configurations les plus représentatives de la mobilisation de ce type d'énergie ont été étudiées dans les études de cas présentées ici.

En ce qui concerne la ressource, trois cas distincts ont donc été retenus : la production de bois énergie directement produit et récolté pour cet usage, notamment sous la forme de taillis à courte rotation (cas IV), la production conjointe de bois énergie et de bois d'œuvre (cas V), la production de bois énergie issu des déchets de récolte et des déchets de transformation du bois (cas VII) et l'effet de bonification du bois énergie à l'échelle globale vis-à-vis du seul stockage de carbone (cas VII), ce dernier cas étant traité séparément et différemment des trois autres.

6.2 DESCRIPTION À L'ÉCHELLE LOCALE OU OPÉRATIONNELLE

Le schéma opérationnel récapitulant les trois cas d'étude et les différents flux d'énergie et de carbone associés est présenté Figure 6. 4.

6.2.1 Types d'exploitation

La production de bois énergie peut se faire selon différents modes d'exploitation. Trois sont retenus pour la présente étude :

- Le taillis à courte rotation (TCR), ou à très courte rotation (TTCR),
- La production de bois de feu conjointement avec la production de bois d'œuvre,
- La production de bois énergie à partir des différents types de déchets, les déchets de récolte ou les déchets de transformation du bois.

Dans le cas du taillis à courte rotation, le mode de récolte est la coupe rase. Dans les autres cas, il peut s'agir soit de coupes rases, soit d'éclaircies, le volume de bois et la quantité d'énergie nécessaire pour la récolte variant d'un cas à l'autre. La part des éclaircies représente typiquement 10 à 20 % de la biomasse récoltée.

a) Taillis à courte rotation (cas IV)

Les exploitations de type TCR (généralement constituées de peupliers) ou TTCR (constituées plutôt de saules), ont un mode de sylviculture qui se rapproche de celui de l'agriculture. Outre l'espèce plantée, la principale différence entre les deux est la durée de rotation entre chaque récolte : la récolte se fait en moyenne tous les 7 ans dans le cas des cultures de peupliers, alors qu'elle peut se faire tous les 2 ou 3 ans pour les saules. En général, la durée de vie des plantations de taillis à courte rotation est de l'ordre de 21 ans, soit après 3 récoltes dans un cas, et après 7 à 10 dans l'autre.

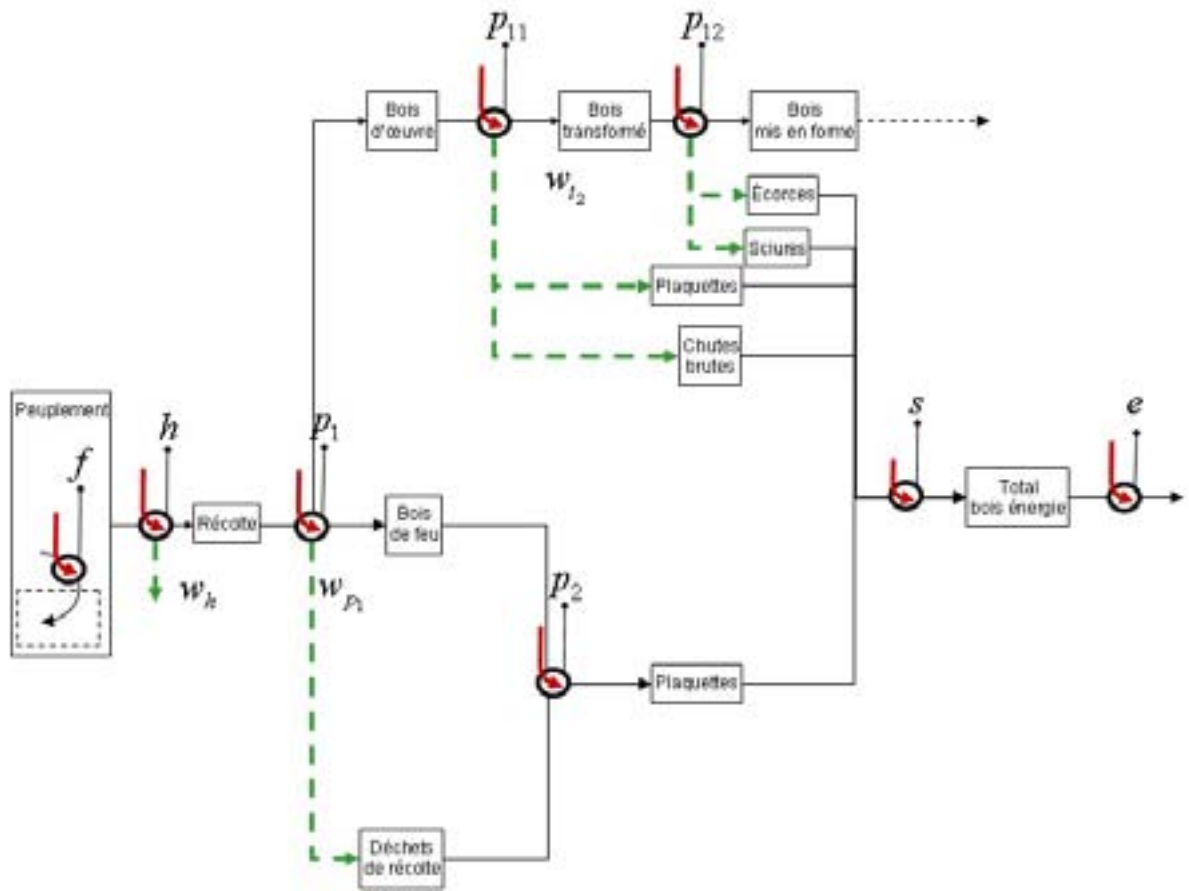


Figure 6. 4 - Schéma opérationnel des cas IV, V et VI

Le taillis à courte rotation constitue le mode de production du bois énergie qui comporte le moins d'opérations de transformation. De plus, le bois énergie étant le seul produit de l'exploitation, aucun problème d'allocation des consommations d'énergie ne se pose. Après la récolte, deux options peuvent se présenter : soit le bois est décheté sur place puis transporté sur le lieu d'utilisation, soit il est d'abord transporté avant d'être décheté sur le lieu d'utilisation, après séchage.

Dans la suite du travail, seul le cas du TCR de peupliers est pris en compte, le TCCR n'étant cité qu'à titre indicatif. Les flux sont ramenés à un hectare de plantation, et à une année, en supposant que la durée de rotation est de 7 ans. Dans ces conditions, la biomasse récoltée à chaque rotation est prise égale à 30 t bois sec/ha, en supposant une productivité de 12 m³ de bois par hectare et par an, avec une densité de bois sec de 0,34 t/m³ [Dewar et Cannell, 1992].

b) Production conjointe de bois énergie et de bois d'œuvre (cas V)

Une récolte peut être destinée à la fois au bois d'œuvre et au bois énergie. Le bois destiné aux usages énergétiques est alors du même type que le bois de trituration. Pour cette étude de cas, l'hypothèse simplificatrice est donc faite que pour une parcelle étudiée, le bois récolté est utilisé soit comme bois d'œuvre, soit comme bois énergie, en supposant qu'il n'y a pas d'utilisation pour la trituration. Dans ce cas se pose la question de l'allocation des consommations d'énergie à chacun des deux usages. Le mode de répartition choisi ici, relativement classique, est celui de répartir les quantités d'énergie utilisées proportionnellement aux masses de bois destinées à chacun des usages.

Par ailleurs, pour tenir compte d'une certaine réalité, il est tout de même supposé dans ce cas qu'une partie de la biomasse est laissée sur place comme déchets de récolte, et non pas que toute la biomasse potentiellement récoltable est exportée de la parcelle. Cette part, destinée à la régénération du sol dans le peuplement, est estimée pour cette étude de cas à environ 10 % du total de la biomasse abattue durant la récolte, mais elle peut varier suivant les pays entre 5 et 20 % de l'accroissement annuel de biomasse.

Pour ce cas, les valeurs numériques retenues correspondent au cas du pin des Landes étudié précédemment.

c) Valorisation des déchets du bois sous forme d'énergie (cas VI)

Le dernier cas proposé concerne la valorisation énergétique de tous les déchets du bois, qu'il s'agisse des déchets de récolte évoqués précédemment ou des divers déchets de transformation du bois rond. Dans le cas des déchets de bois, le mode d'affectation est plus délicat que dans le cas juste précédent. Les consommations d'énergie sont en effet généralement imputées entièrement aux produits transformés, et pas du tout aux déchets de transformation, ni aux déchets de récolte lorsqu'ils sont récupérés. Cependant, dans l'objectif de comparer les bilans énergétiques et les bilans de carbone des divers modes de production de bois énergie, il a été choisi ici d'affecter une partie de l'énergie consommée pour la récolte et pour la transformation des produits aux différents déchets valorisés, en proportion des masses relatives de bois concernées.

Le mode de calcul des consommations d'énergie varie donc légèrement dans ce cas précis par rapport à tous les cas précédents, afin de traduire la valeur ajoutée liée à la fonction de production d'énergie donnée aux différents déchets.

Pour ce cas, les valeurs numériques retenues correspondent au cas du pin des Landes étudié précédemment.

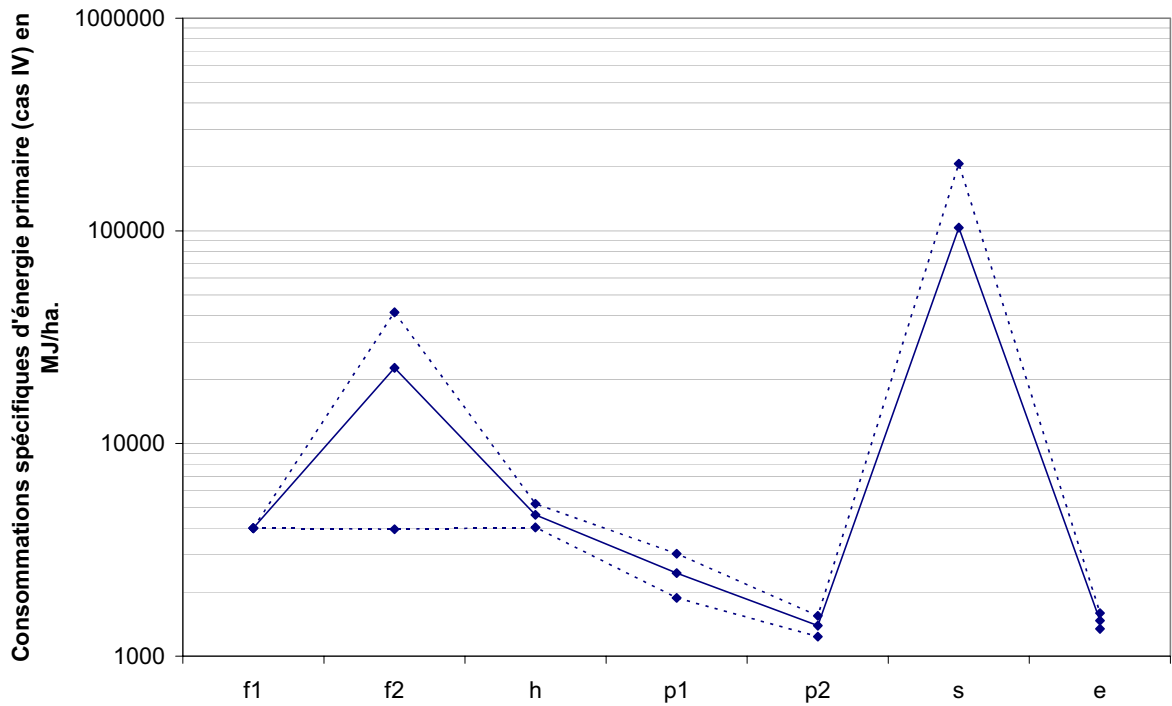


Figure 6. 5 - Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas IV

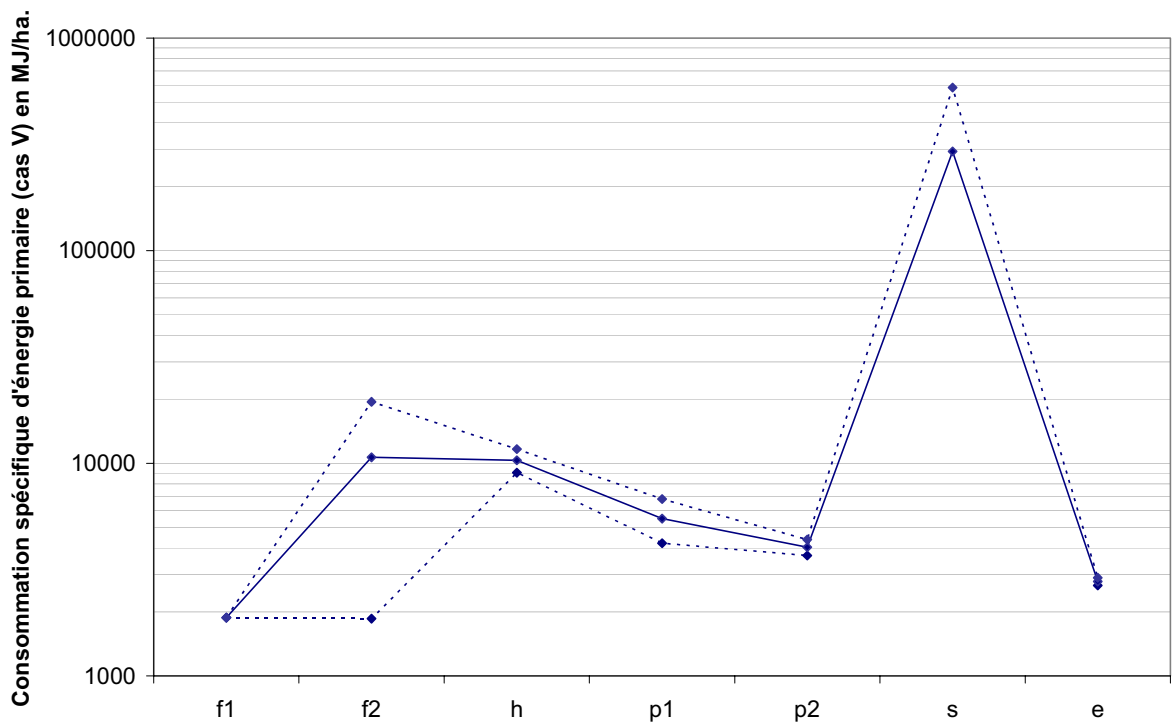


Figure 6. 6 - Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas V

6.2.2 Types de combustible

Les formes les plus répandues sont les combustibles bois sous forme de plaquettes et les bûches, utilisées notamment pour le chauffage domestique. Le cas des bûches utilisées pour le chauffage individuel sera ici laissé de côté et évoqué seulement à titre indicatif.

Les plaquettes forestières sont généralement obtenues par déchiquetage du bois, soit en forêt au moment de la récolte, soit sur le lieu d'utilisation du combustible. Les rendements matière de transformation en plaquettes sont relativement élevés : ils varient entre 85 et 95 %, en fonction du type de machine utilisé, de la taille des morceaux de bois avant déchiquetage et de la qualité du bois déchiqueté.

Le contenu énergétique du combustible varie en fonction de sa nature (essence, forme du combustible), mais bien sûr surtout en fonction de son humidité et de sa densité. Dans l'objectif d'avoir des données énergétiques homogènes, donc comparables, il est supposé que le PCI du bois sec est de 18,2 GJ/t, en supposant un contenu en carbone moyen de 0,5 t C/t bois sec. Il est légèrement supérieur pour les bois résineux (entre 18,6 et 18,3 GJ/t) par rapport aux essences feuillues (dont le PCI varie plutôt entre 17,5 et 18,9 GJ/t), dont le contenu en carbone est un peu plus faible. Le PCI diminue linéairement et assez fortement avec l'augmentation de la teneur en eau du bois.

6.2.3 Types d'énergie produite et mode de substitution

Comme il a déjà été précisé précédemment, les types d'énergie produite à partir du bois peuvent être relativement variés. Si le principal type d'énergie reste la chaleur, il est aujourd'hui envisageable de produire d'autres formes d'énergie finale à partir de bois, comme notamment de l'électricité.

Différentes installations sont donc considérées, et leurs caractéristiques (rendement, puissance...) permettent de définir des coefficients de substitution avec les énergies fossiles carbonées, en tenant compte tout à la fois des émissions de carbone et des performances des installations. Les types d'installations de production d'énergie à partir du bois retenus pour les cas IV à VI sont les suivants :

- petits équipements de chauffage individuel,
- chauffage central,
- réseaux de chaleur,
- cogénération de chaleur et d'électricité,
- production d'électricité seule.

Le calcul de la substitution se fait en comparant les bilans de carbone émis par unité d'énergie produite pour le bois énergie d'une part, et pour les énergies fossiles d'autre part. Deux principaux types d'émissions peuvent être distingués : les émissions liées à l'obtention du combustible et les émissions propres à la combustion ou à la production d'énergie finale proprement dite.

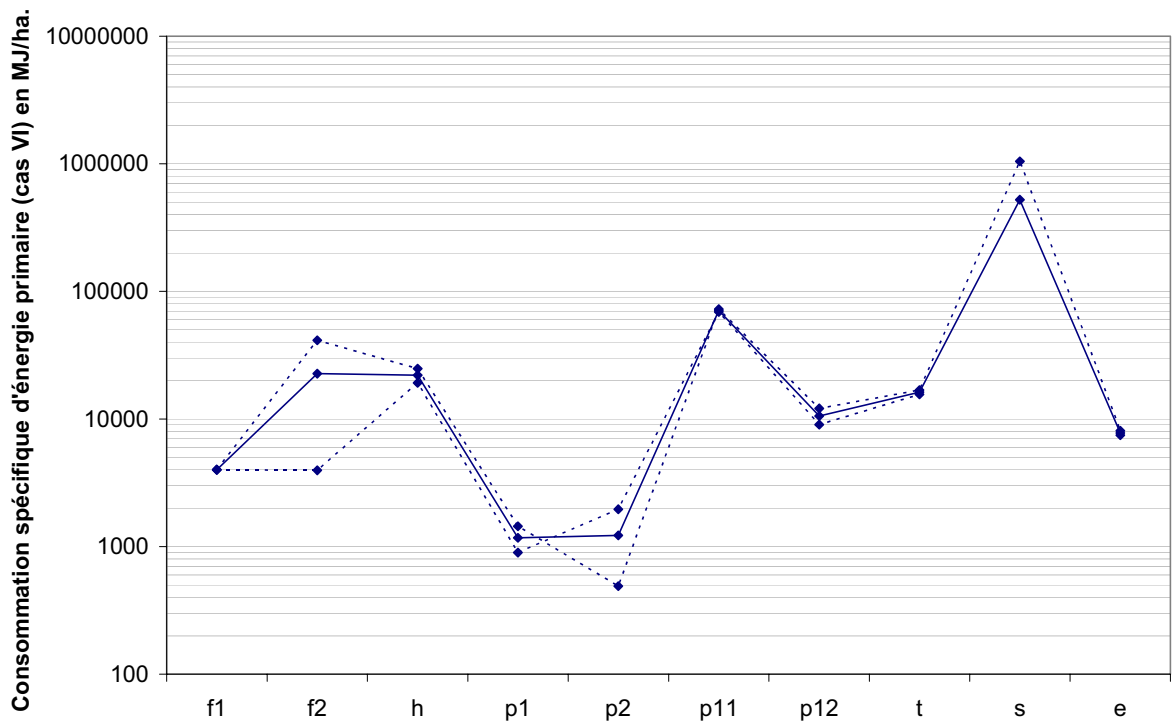


Figure 6.7 - Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas VI

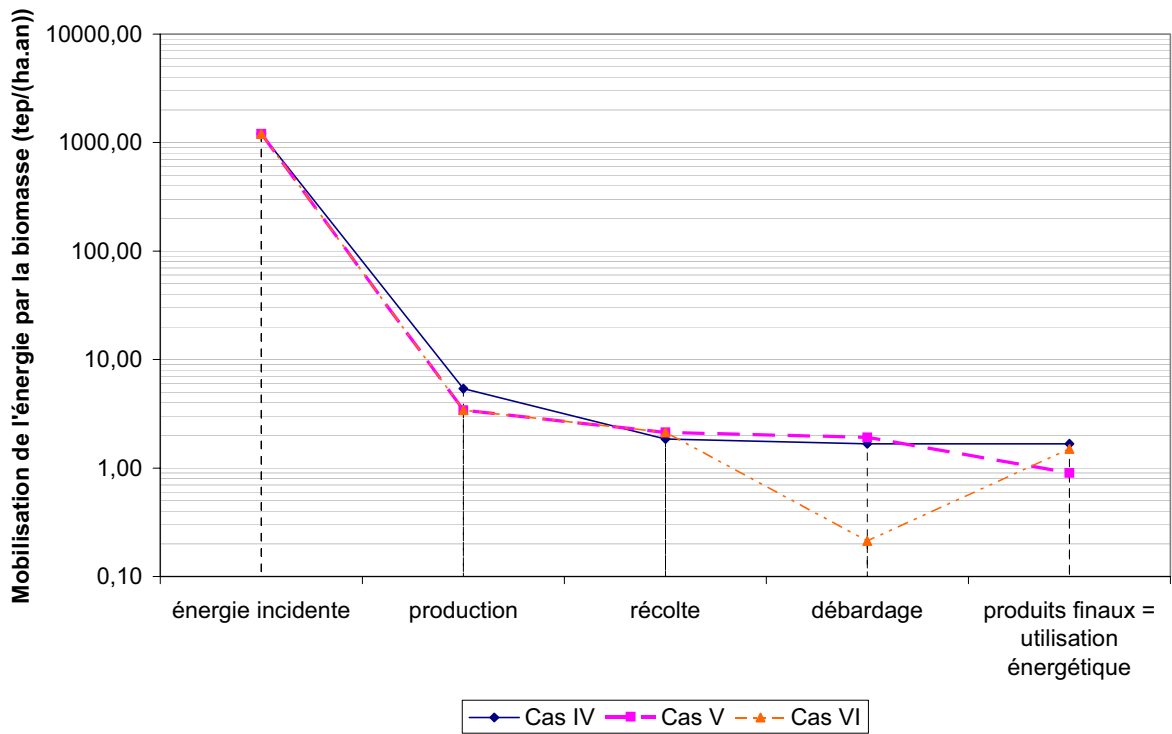


Figure 6.8 - Mobilisation de l'énergie dans la biomasse au fil des étapes de transformation dans les cas IV, V et VI

En ce qui concerne la production d'énergie à partir d'énergies fossiles, différentes configurations ont été retenues pour chacun des types d'installations détaillés précédemment, en accord avec la littérature [CLIP, 1998] :

- la production de chaleur à partir de petits équipements n'est comparée qu'à l'équivalent produit à partir d'électricité,
- le chauffage central quant à lui est comparé aux trois grands vecteurs fossiles que sont, le gaz naturel, le fioul et le charbon, ainsi qu'à la production de chaleur à partir d'électricité,
- la comparaison pour les réseaux de chaleur ainsi que pour la cogénération porte sur les mêmes types d'énergie que le chauffage central,
- enfin, dans le cas de la production d'électricité seule, le bois énergie est comparé au gaz naturel et au charbon.

Les valeurs des coefficients d'émissions de carbone, pour la production d'énergie à partir des différents combustibles fossiles et à partir de l'électricité, sont relatifs à des moyennes européennes. Par ailleurs, comme dans les précédents cas étudiés, l'énergie contenue dans les équipements et infrastructures, ainsi que les émissions de carbone résultant de leur fabrication sont négligées dans les calculs.

6.3 FLUX ET BILANS

Il s'agit ici de détailler les flux et bilans d'énergie et de carbone pour la seule production d'énergie à partir du bois, dans les trois configurations détaillées dans les cas IV, V et VI. Les bilans concernant les énergies fossiles substituées ne sont pas détaillés plus avant.

6.3.1 Flux d'énergie

a) Flux d'énergie issus de la biomasse

Les flux d'énergie issus de la biomasse sont rigoureusement du même type que dans les cas I et II. Du fait des opérations successives et de leurs rendements matière, le contenu énergétique du bois produit diminue au cours des transformations dans les cas IV et V, alors qu'il augmente dans le cas VI, du fait de l'accumulation des déchets.

De même que dans les cas I et II, l'énergie solaire incidente au sommet de la parcelle est évaluée à 1200 tep/(ha.an), soit 50400 GJ/(ha.an). Cette énergie est en partie matérialisée dans la biomasse, puis dégradée au fil des transformations. C'est dans le cas IV que la production d'énergie est la plus importante, suivi du cas VI et du cas V. En revanche, le rendement d'utilisation de la production est moins bon dans ce cas, car il a été tenu compte d'un facteur d'expansion plus important (2,9) compte tenu de l'âge jeune du peuplement, alors que dans les cas V et VI, le facteur d'expansion est moins grand (1,6).

Les courbes traduisant l'évolution du contenu énergétique de la biomasse dans les trois cas sont présentées Figure 6. 8.

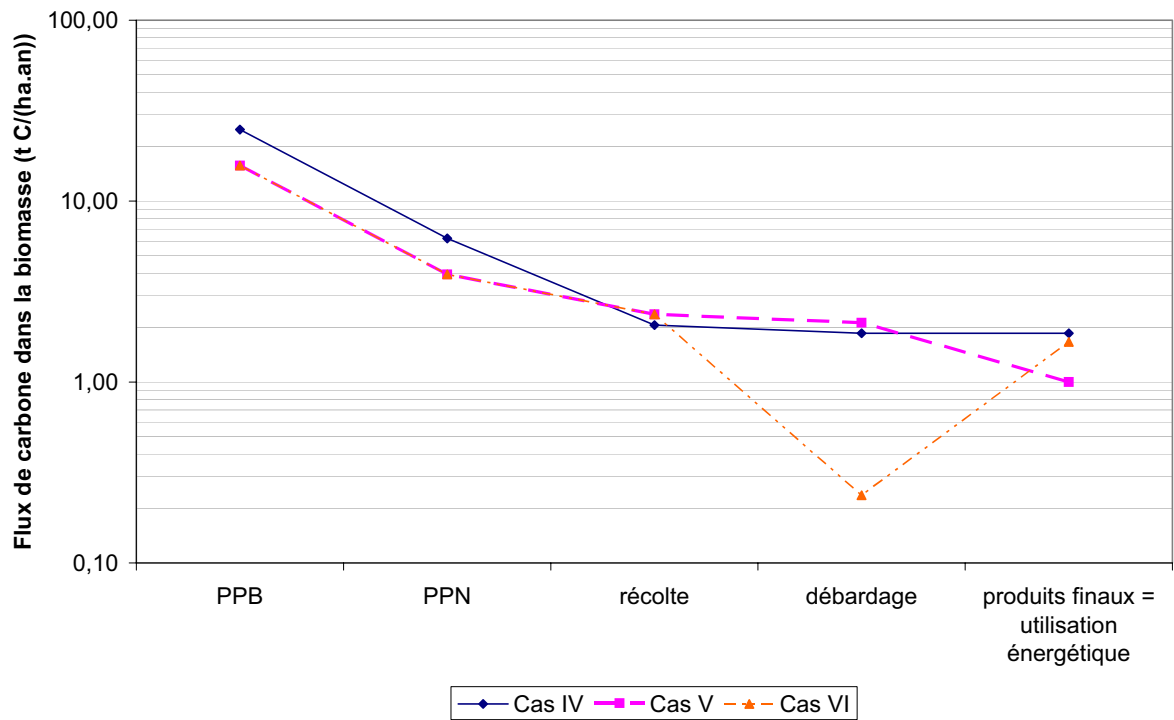


Figure 6. 9 - Flux de carbone dans la biomasse au fil des transformations dans les cas IV, V et VI

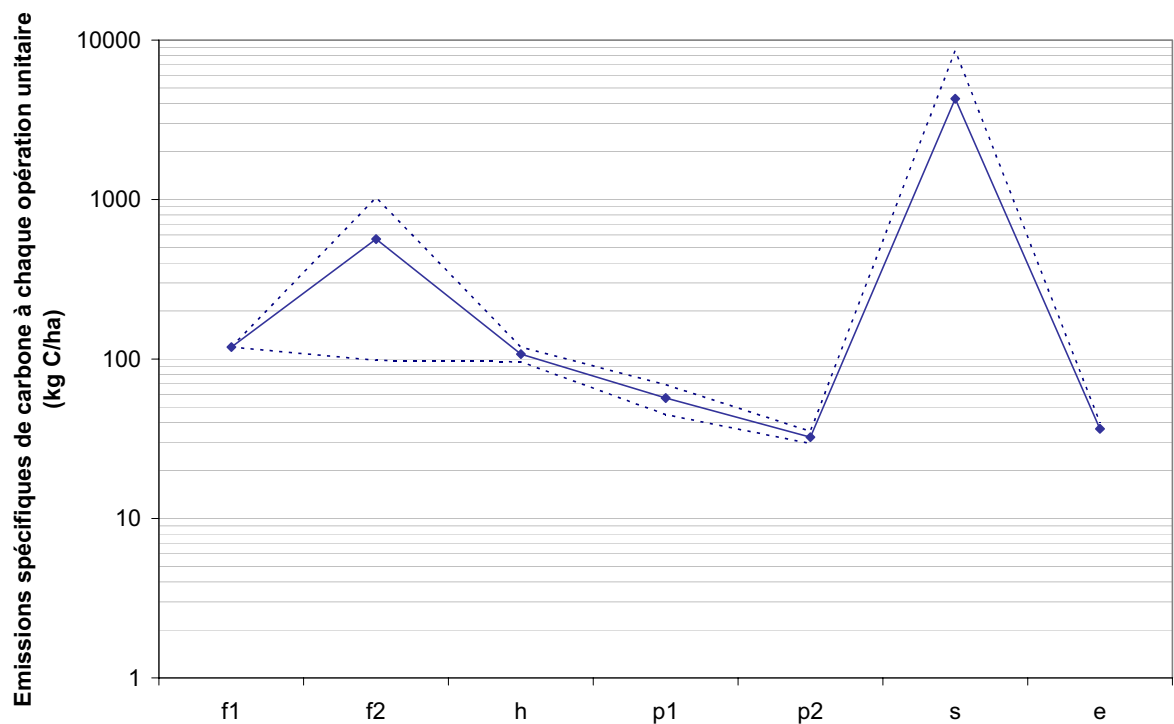


Figure 6. 10 - Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas IV

b) Flux d'énergie externe

De même que dans les cas précédents, les flux d'énergie fossiles correspondent aux diverses opérations effectuées sur le bois avant son utilisation finale, ici sous forme d'énergie. Les consommations spécifiques d'énergie relatives aux opérations des cas IV, V et VI sont présentées Figures 6. 5, 6. 6 et 6. 7.

Ils sont donc présents pour la transformation du bois et pour les différentes phases de transport ou de séchage lorsque celui-ci n'est pas naturel. Les formes d'énergie sont rigoureusement les mêmes que dans les cas précédents, c'est-à-dire du carburant, de l'énergie électrique, de la chaleur, de l'huile, des engrais, des filets de protection, mais pas de produits de type résine, dans la mesure où le bois énergie ne nécessite pas d'additifs particuliers.

Dans le cas IV, les opérations se limitent à la sylviculture (f_1 et f_2), la récolte (h), le débardage (p_1), le déchiquetage (p_2) et le transport vers le lieu d'utilisation (e). Dans le cas V, les opérations sont rigoureusement les mêmes, mais s'appliquent à un volume de bois récolté différent, puisque le total de la récolte dans ce cas est fixé à $400 \text{ m}^3/\text{ha}$, dont 53 % est destiné au bois d'œuvre. Dans le cas VI en revanche, le nombre d'opérations à prendre en compte est plus élevé, dans la mesure où il s'agit de déchets de transformation. Dans ce cas, les consommations spécifiques d'énergie correspondent à la quantité d'énergie utilisée lors de l'opération, pondérée par le pourcentage massique de déchets. Il y a lieu dans le cas VI de tenir compte d'opérations supplémentaires, correspondant à la première transformation du bois (p_{11}), la deuxième transformation (p_{12}) et au transport des déchets vers le lieu de stockage (t). Dans les deux autres cas, il est supposé que le bois énergie est acheminé directement vers le lieu d'utilisation, ce qui implique qu'il n'y a qu'une seule phase de transport, intégrée à l'opération e .

Dans les trois cas, le flux d'énergie externe le plus important correspond au séchage du bois, lorsqu'il n'est pas naturel. Il est aussi remarquable que compte tenu des rendements matière faibles retenus dans le cas VI, les apports d'énergie dans les opérations de transformation p_{11} et p_{12} sont également relativement importants.

6.3.2 Flux de carbone

c) Flux de carbone issus de la biomasse

Les flux annuels de carbone dans la biomasse sont déterminés à partir de la production annuelle de l'écosystème, tout comme dans les cas étudiés précédemment.

Leur évolution dans les cas IV, V et VI est donnée Figure 6. 9 : l'allure générale de ces courbes est bien sûr très proche de la courbe du contenu énergétique, dans la mesure où, sauf pour la production primaire, ces deux courbes sont directement proportionnelles.

d) Flux de carbone externe

En ce qui concerne les flux de carbone externes, les coefficients spécifiques d'émissions pour chaque opération unitaire sont les mêmes que ceux utilisés précédemment, dans les cas I, II et III. Ils sont consignés dans les Figures 6. 10, 6. 11 et 6. 12.

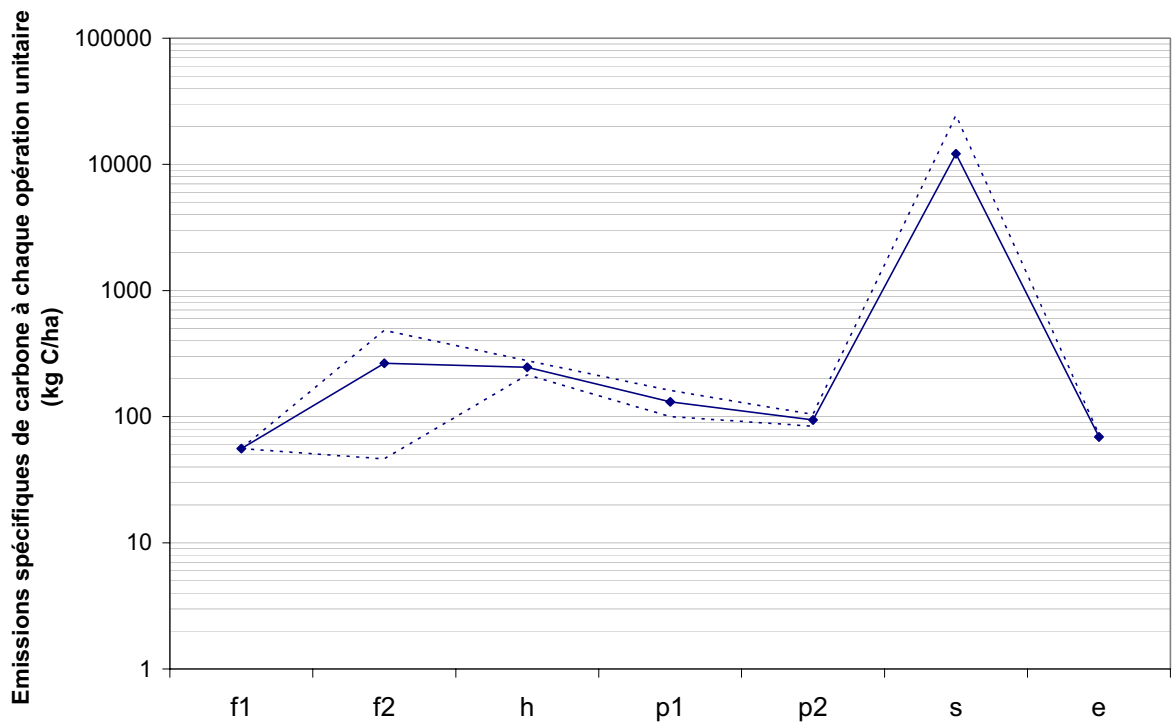


Figure 6.11 - Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas V

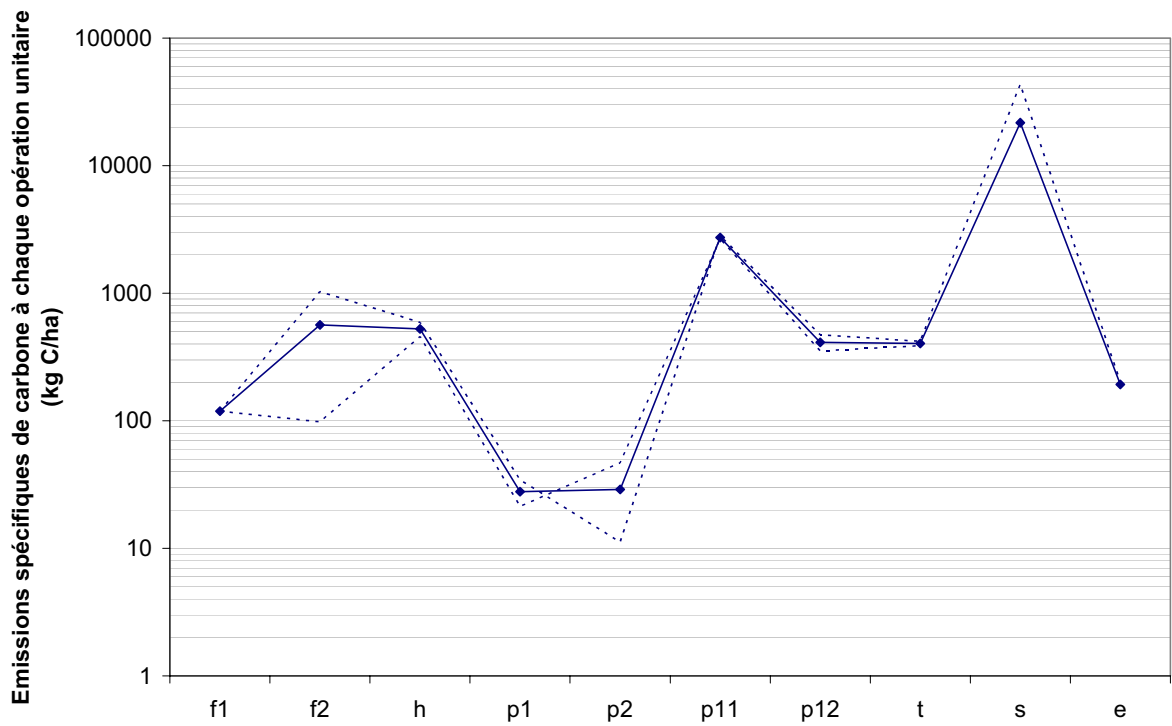


Figure 6.12 - Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas VI

6.3.3 Bilans

a) Références choisies pour les bilans

Tout comme dans les cas précédents, dans l'objectif de comparer les trois configurations présentées dans les cas IV, V et VI, il convient de définir une référence temporelle sur laquelle les bilans sont effectués. L'horizon temporel retenu ici est encore celui de 100 ans (cette horizon temporel est d'autant plus pertinent qu'il correspond à celui utilisé pour le calcul du pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre par le GIEC).

Les valeurs des coefficients d'émissions liées aux différentes consommations d'énergie sont les mêmes que dans les chapitres précédents. En ce qui concerne la substitution énergétique du bois aux combustibles fossiles, il convient de prendre en compte le type de combustible substitué, ainsi que les rendements respectifs des installations fonctionnant à partir du bois et des installations conventionnelles, pour estimer l'effet de la substitution en regard de l'énergie utile fournie.

b) Bilans d'énergie

À partir des coefficients spécifiques d'utilisation d'énergie externe affectés à chacune des opérations identifiées, il est possible de dresser un bilan global des consommations d'énergie primaire externe, de la même façon que dans les deux chapitres précédents :

$$E_{\text{fossile,totale}} = e_{f1} + e_{f2} + e_h + \dots \quad (6.1)$$

C'est dans le cas IV que les consommations d'énergie, et donc les émissions de carbone, sont les plus faibles, du fait du plus petit nombre d'opérations et du fait que les opérations mobilisent moins d'énergie externe.

c) Bilans de carbone

Pour dresser les bilans de carbone relatifs aux trois cas étudiés dans ce chapitre, il y a lieu de prendre en compte :

- le carbone capté lors de la croissance de l'écosystème, correspondant à la production primaire nette du peuplement,
- le carbone émis lors de la mise à disposition du bois énergie,
- le carbone émis lors de la combustion du bois énergie, correspondant au contenu en carbone du bois, en supposant que la combustion est complète et que tout le contenu en carbone est émis sous forme de CO₂,
- le carbone non émis du fait de la substitution du bois aux énergies fossiles identifiées.

Les caractéristiques de chacun des cas sont récapitulées Tableau 6. 4, Tableau 6. 5 et Tableau 6. 6. Dans tous les cas, les émissions de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles sur tout le cycle de production du bois énergie varie en moyenne entre 34 et 46 % des émissions évitées du fait de la substitution. L'efficacité de substitution est donc, en moyenne, comprise entre 2,2 et 2,9, en la définissant comme le rapport des émissions de carbone évitées aux émissions de carbone sur tout le cycle de vie du combustible bois.

Tableau 6. 1 - Caractéristiques des opérations unitaires dans les cas IV, V et VI

Opération	Consommation spécifique d'énergie externe, e_i en MJ/U	Type d'énergie finale	Rendement matière, ε_i	Unité de référence, U
f_1	4002	Carburant : 14 % Phytosanitaires/engrais : 86 %	-	ha
f_2	[3955-41429]	Carburant : 100 %	[0,06-0,12]	ha
h	[48-62]	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[3,3-4,6]	m ³ bois récolté
p_1	[28-38]	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[0,8-0,95]	m ³ bois récolté
p_2	38	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	[0,95-1]	t de plaquettes
p_{11}	407	Électricité : 88 % Carburant : 8 % Huiles : 4 %	[0,47-0,53]	m ³ de bois transformé
p_{12}	200	Électricité : 87 % Carburant : 12 % Huiles : 1 %	0,7	m ³ bois transformé
t	82	Carburant : 100 %	1	t de plaquettes
s	[0-6100]	Électricité : 0 à 100 % Chaleur (autre) : 0 à 75 %	1	t de bois séché

Tableau 6. 2 -Récapitulatif des émissions de carbone par unité d'énergie utile pour les combustibles fossiles, d'après Barbier et Whitwam [CLIP, 1998].

Type d'installation	Émissions par unité d'énergie utile produite (t C/tep _{utile})			
	Gaz naturel	Fioul	Charbon	Électricité
Installations individuelles	-	-	-	1,63
Chauffage central	1,06	1,23	2,03	1,41
Réseau de chaleur	1,06	1,28	1,76	1,59
Cogénération	1,01	1,66	1,63	-
Électricité	1,51	-	3,17	-

6.4 ÉTUDES DE SENSIBILITÉ

6.4.1 Type d'énergie fossile substituée

Le bilan net de carbone dépend bien sûr du type d'énergie fossile qui est substituée par du bois énergie. Ainsi, la substitution sera d'autant meilleure que le combustible fossile substitué a un fort contenu en carbone (Figure 6. 13, Figure 6. 14 et Figure 6. 15).

Dans chacune des configurations, la répartition des émissions évitées entre les différentes sources d'énergie a la même forme. La substitution est meilleure dans les cas IV et V, qui ont des valeurs relativement proches. Elle est moins bonne dans le cas de la valorisation des déchets, du fait du mode d'affectation choisi pour les consommations d'énergie. Il est évident que dans le cas où les consommations d'énergie seraient affectées uniquement aux produits du bois, la substitution serait d'autant meilleure.

6.4.2 Type d'énergie finale produite

Le type d'énergie finale produite a également une influence sur le bilan net, dans la mesure où les rendements sont différents d'une technologie à une autre.

Cette sensibilité dépend donc à la fois du rendement de l'installation fonctionnant à partir du bois énergie que de celui de l'installation fonctionnant au combustible fossile carboné remplacé.

Il est à noter d'emblée que la production d'électricité utilisée ici ne reflète pas toutes les possibilités, et en particulier pas le cas de la France, pour lequel les émissions de carbone par unité d'énergie utile sont beaucoup plus basses, du fait de la production d'origine nucléaire.

6.5 EFFET DE BONIFICATION DU BOIS ÉNERGIE À L'ÉCHELLE GLOBALE : CAS VII

Le cas VII abordé ici a en particulier deux caractéristiques intéressantes :

- il correspond à un traitement de la problématique bois énergie et stockage de carbone à l'échelle globale,
- il met en évidence un couplage fort entre deux démarches, celles développées successivement dans le chapitre 4 et dans le chapitre 6, à savoir les objectifs de stockage de carbone et de production de bois énergie, remplis dans un même usage conjoint des forêts.

6.5.1 Scénarios retenus

Dans une première description à l'échelle globale, il est possible d'évaluer comparativement l'utilisation des écosystèmes forestiers pour le seul stockage de carbone et pour l'usage conjoint stockage de carbone et production de bois énergie. Pour effectuer cette comparaison, une référence doit être fixée : elle est prise par rapport aux consommations d'énergies fossiles et aux émissions résultantes.

Bien sûr, ces trois formes fossiles constituent un ensemble qui pourrait apparaître hétérogène dans la mesure où, en particulier pour le charbon et le pétrole, les réserves sont très différentes. L'agrégat réalisé pourrait donc surprendre sauf à considérer que dans plusieurs décennies, les formes d'exploitation des gisements de charbon peuvent être très variées, comprenant même parfois des processus de « liquéfaction » et de « gazéification ».

Tableau 6. 3 - Récapitulatif des émissions de carbone par unité d'énergie utile pour les cas IV, V et VI

Type d'installation	Rendement	Émissions par unité d'énergie utile produite (t C/tep _{utile})		
		Cas IV	Cas V	Cas VI
Installation individuelle	0,55	[0,07 ; 1,52]	[0,03 ; 1,47]	[0,15 ; 1,70]
Chauffage central	0,7	[0,05 ; 1,20]	[0,03 ; 1,16]	[0,11 ; 1,33]
Réseau de chaleur	0,8	[0,04 ; 1,05]	[0,02 ; 1,01]	[0,10 ; 1,17]
Cogénération	0,85	[0,04 ; 1,99]	[0,02 ; 0,95]	[0,09 ; 1,10]
Électricité	0,4	[0,09 ; 2,10]	[0,04 ; 2,03]	[0,20 ; 2,33]

Tableau 6. 4 - Bilan des indicateurs pour le cas IV

Intitulé	Unité	Caractéristiques de stockage annuelles	Unité	Cumul de C sur 100 ans
$E_{fossile, total}$	tep/(ha.an)	[0,056-0,90]		
$\Gamma_{fossile, total}$	t C/(ha.an)	[0,06-1,4]	t C/ha	[6-140]
$\Gamma_{substitution, total}$	t C/(ha.an)	[1,4-2,1]	t C/ha	[140-210]
$\Gamma_{stocké, total}$	t C/(ha.an)	[0-2,04]	t C/ha	[0-204]

Tableau 6. 5 - Bilan des indicateurs pour le cas IV

Intitulé	Unité	Caractéristiques de stockage annuelles	Unité	Cumul de C sur 100 ans
$E_{fossile, total}$	tep/(ha.an)	[0,016-0,43]		
$\Gamma_{fossile, total}$	t C/(ha.an)	[0,016-0,73]	t C/ha	[2-73]
$\Gamma_{substitution, total}$	t C/(ha.an)	[0,8-1,2]	t C/ha	[80-120]
$\Gamma_{stocké, total}$	t C/(ha.an)	[0,07-1,2]	t C/ha	[7-120]

Tableau 6. 6 - Bilan des indicateurs pour le cas IV

Intitulé	Unité	Caractéristiques de stockage annuelles	Unité	Cumul de C sur 100 ans
$E_{fossile, total}$	tep/(ha.an)	[0,089-0,84]		
$\Gamma_{fossile, total}$	t C/(ha.an)	[0,12-1,4]	t C/ha	[12-140]
$\Gamma_{substitution, total}$	t C/(ha.an)	[1,3-2,0]	t C/ha	[130-200]
$\Gamma_{stocké, total}$	t C/(ha.an)	[(-0,1)-1,9]	t C/ha	[(-10)-190]

Pour chaque hypothèse de réserves de combustibles fossiles, le même scénario de consommation est utilisé, définissant une durée d'épuisement des stocks. Cette durée sert de repère d'observation pour la comparaison entre boisement seul et usage conjoint. On observe, à cet horizon temporel, le cumul du carbone stocké, et évité dans le cas du bois énergie. Le taux de boisement est fixé par hypothèse, pour les réserves récupérables et en place, à 9 Mha/an, valeur comparable au taux actuel de déforestation. Pour les réserves ultimes, ce taux est doublé pour traduire un effort d'investissement dans le stockage de carbone.

Les surfaces disponibles sont estimées avec une incertitude assez grande. Les réserves récupérables correspondent à une moyenne d'estimations des terres abandonnées par l'agriculture (4 à 5 % des terres émergées). Les réserves en place traduisent une mobilisation supérieure (6 % des terres émergées), guidée par un arbitrage entre les usages des sols. Les réserves ultimes correspondent enfin à une priorité donnée à l'usage des sols pour l'établissement de nouvelles forêts, sur de très larges étendues (16 % des terres émergées).

6.5.2 Comparaison à l'échelle globale du stockage seul et avec production de bois énergie

Différents potentiels peuvent être estimés, en termes de surfaces et d'utilisations du bois, avec divers degrés d'incertitude dépendant du niveau de contraintes dans les hypothèses. Potentiels théoriques maximaux, possibles et certains dépendent des critères retenus pour le choix des paramètres déterminants : surfaces disponibles, productivités sur ces surfaces, parts relatives du bois matériau et du bois énergie [Cannell, 2003].

Le Tableau 6. 7 compare les réserves énergétiques fossiles et les réserves de surface pour trois catégories de réserves (prouvées récupérables, prouvées en place, et ultimes), classées des plus certaines aux plus incertaines. Les catégories de réserves fossiles, en fonction de scénarios de référence [Wigley et Schimel, 2000], déterminent avec une incertitude croissante des horizons temporels proches, lointains ou très lointains. La mobilisation forestière des surfaces est étudiée, avec un scénario de boisement simple, du point de vue de l'impact sur les émissions nettes de carbone.

Une comparaison est faite entre le stockage seul, directement lié au scénario retenu, et l'usage conjoint stockage - bois énergie. Les éventuels effets naturels liés à l'accroissement du stock existant ne sont pas pris en compte. Le facteur de bonification du bois énergie est alors défini en rapportant les flux captés et évités dus au stockage avec production de bois énergie à ceux du stockage seul.

Le stock de combustibles fossiles, donné par la ligne (a) du Tableau 6. 7, définit un stock de carbone équivalent, correspondant à la totalité du carbone qui est émis par l'utilisation de la totalité de chacune des réserves, ligne (b). Le scénario de consommation d'énergie permet ensuite de calculer une durée d'épuisement des stocks, donnée ligne (d). C'est sur cette durée que les deux usages des forêts, stockage de carbone et stockage avec production de bois énergie, seront comparés. Les lignes (e) et (f) définissent les paramètres de boisement des surfaces, respectivement les surfaces mobilisables et le taux annuel de boisement, dont le rapport donne une durée d'établissement des forêts (g).

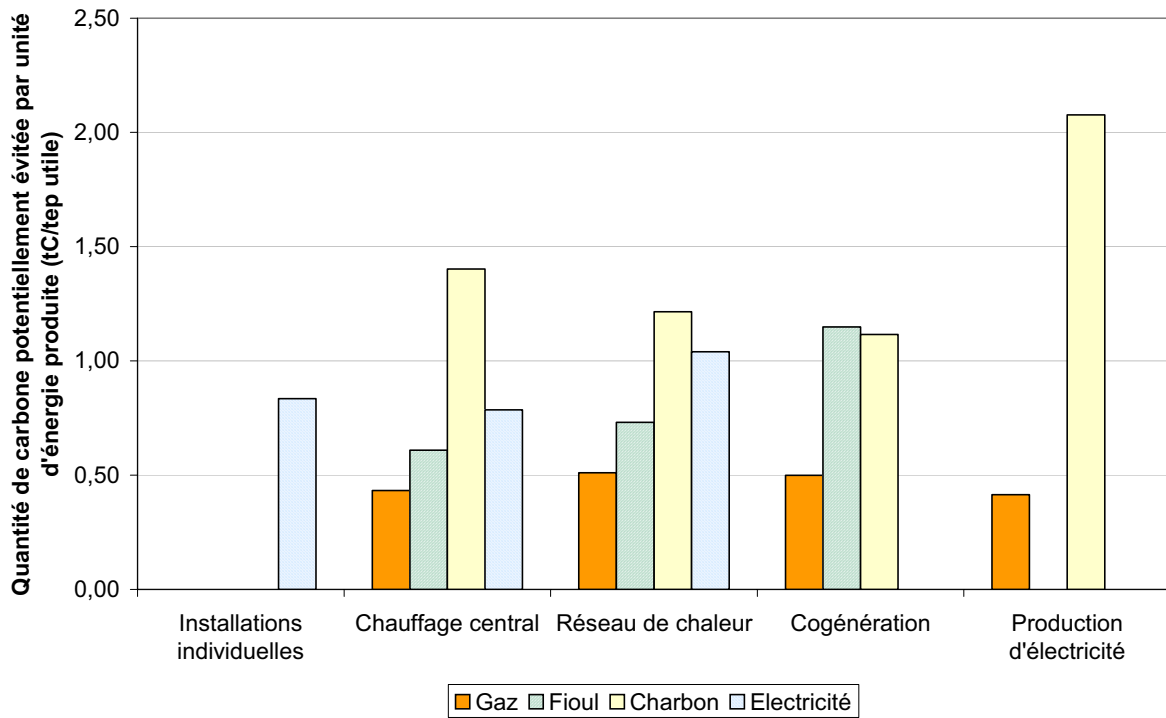


Figure 6.13 - Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas IV)

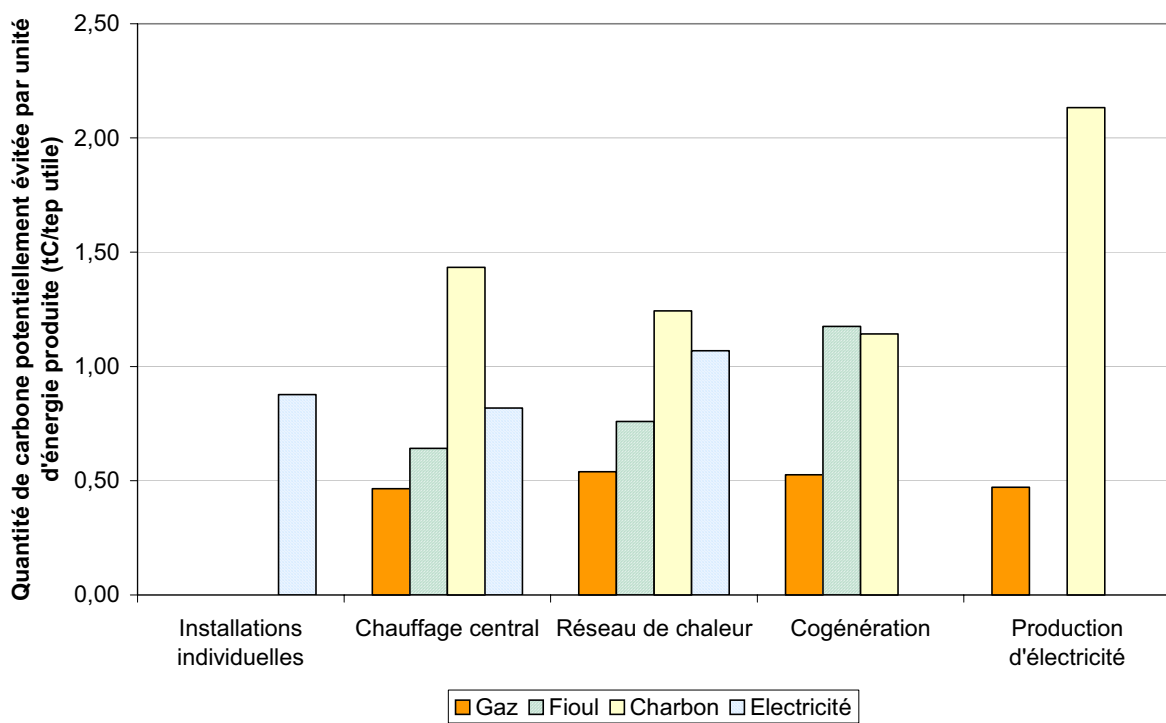


Figure 6.14 - Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas V)

Le stock de carbone constitué dans les forêts est alors calculé, pour chaque niveau de réserves fossiles, en cumul sur la durée d'épuisement du stock fossile correspondant. Il est donné pour le seul stockage par la ligne (h) et pour le stockage avec production de bois énergie par la ligne (i). Enfin, dans le cas où la biomasse est récoltée pour produire du bois énergie, les émissions évitées du fait de la substitution du bois aux énergies fossiles sont calculées (j), et cumulées sur la période de référence définie auparavant.

Bien sûr, la substitution implique que la consommation d'énergie fossile diminue et modifie du même coup la durée d'épuisement des stocks d'énergie fossile. La ligne (k) précise dans le cas où le bois énergie est utilisé, le cumul des émissions de carbone diminuées des émissions évitées par la substitution. La totalité des effets du stockage avec bois énergie est donnée par la ligne (l). Tous ces paramètres étant définis, l'effet de bonification du bois énergie correspond simplement au rapport de la ligne (l) sur la ligne (h), c'est-à-dire au rapport du stockage avec diminution des émissions au stockage seul.

La bonification est évidente (de 1,3 jusqu'à 20 dans le cas des ressources ultimes) même si, compte tenu du scénario de boisement conservatoire, il paraît modéré sur les premières années (Figure 6. 16). Sur le long terme, à mesure que les stocks constitués n'évoluent plus, le bois énergie devient prépondérant : malgré les incertitudes tant sur les réserves fossiles ultimes que sur la capacité à aménager les plus grandes réserves de sols, la bonification énergie se révèle une voie majeure permettant de limiter les effets négatifs d'un recours aux stocks fossiles ultimes.

Le scénario étudié s'avère cependant insuffisamment ambitieux si d'autres actions ne sont pas mises en œuvre [Tissot, 2003] (maîtrise de la demande, autres énergies renouvelables, ...) : la mobilisation des réserves ultimes U1, avec stockage et bois énergie, émettrait en un siècle 650 Gt C en bilan net, dont seule une partie pourrait être naturellement absorbée par les océans. C'est sur un terme encore plus lointain que l'effet de bonification devient plus significatif (réserves U2 et U3). Comme dans toutes les problématiques énergétiques, il ne faut pas compter sur une solution unique, mais au contraire sur un « mixte » de solutions complémentaires.

6.6 ÉLÉMENTS POUR UNE CONCLUSION

6.6.1 Paramètres pertinents, goulots d'étranglement

Les paramètres pertinents dans le cas du bois énergie, outre la quantité de bois récolté, sont donc :

- le type de ressource, qui détermine les caractéristiques du combustible (PCI, masse volumique...),
- le type d'énergie produite, qui détermine le rendement de l'installation ainsi que celui de l'installation substituée,
- le type de combustible remplacé, pour déterminer les émissions évitées et donc la bonification énergie.

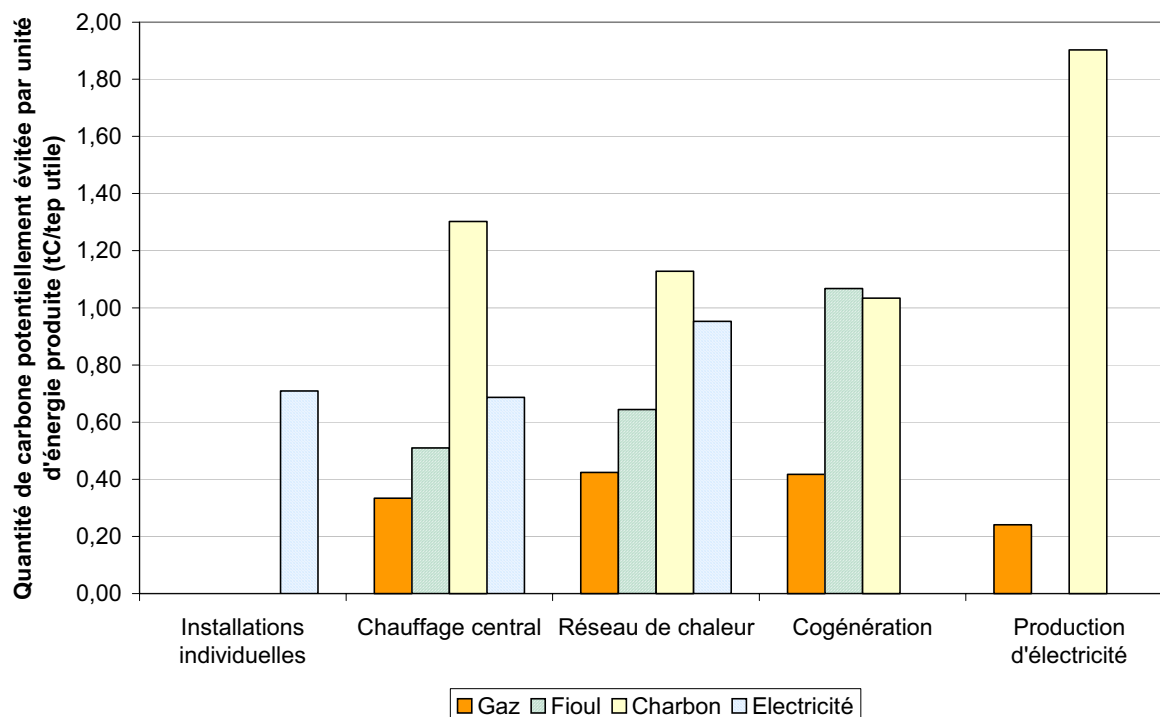


Figure 6.15 - Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas VI)

Tableau 6.7 - Comparaison des effets du seul stockage et du stockage avec production de bois énergie à l'échelle globale pour différents stocks de combustibles fossiles : réserves prouvées récupérables, prouvées en place et ultimes (à trois niveaux).

			Réserves prouvées récupérables	Réserves prouvées en place	Réserves ultimes		
			PR	PP	U1	U2	U3
Réserves de combustibles fossiles carbonés							
(a)	Stock (gaz, pétrole et charbon)	Gtep	950	1330	1480	4740	23410
(b)	Stock (équivalent des émissions en C)	Gt C	1030	1320	1500	5090	17350
(c)	Consommation moyenne, i.e. (a)/(d)	Gtep/an	13,3	13,8	13,9	14,8	15,3
		Gt C/an	10,5	10,9	11,0	11,7	12,1
(d)	Durée d'épuisement des stocks	Années	71	96	106	320	1530
Réserves de surfaces à boiser							
(e)	Surfaces mobilisables	Mha	610	920	2390	2390	2390
(f)	Taux de boisement annuel	Mha/an	9	9	18	18	18
(g)	Durée de plantation, i.e. (e)/(f)	Années	68	102	133	133	133
Stockage libre (sans exploitation)							
(h)	Stockage cumulé	Gt C	160	220	450	650	650
		% de (b)	15%	17%	30%	13%	4%
Stockage et bois énergie							
	Durée modifiée des stocks	Années	77	110	191	1001	5617
(i)	Stockage cumulé	Gt C	110	170	440	440	440
(j)	Emissions évitées cumulées	Gt C	90	170	410	2950	12200
(k)	Emissions résultantes cumulées, i.e. (b)-(l)	Gt C	830	980	650	1700	4710
		% de (b)	9%	13%	27%	58%	70%
Total							
(l)	Cumul total, i.e. (i)+(j)	Gt C	200	340	850	3390	12640
		% de (b)	20%	25%	57%	67%	73%
	Bonification du bois énergie, i.e. (l)/(h)		1,28	1,51	1,89	5,25	19,57

6.6.2 Potentiel à grande échelle

Comme pour le stockage de carbone, deux types d'actions sont possibles sur les surfaces pour augmenter l'usage du bois énergie. À l'échelle mondiale, une large part des terres marginales ou abandonnées par l'agriculture, dédiée à des plantations pour le bois énergie, pourrait produire jusqu'à 3 Gtep/an à l'horizon 2050 [Berndes et al., 2003]. La valorisation des résidus forestiers, dans le cadre d'exploitations existantes, présente également un potentiel important (0,2 à 0,4 Gtep/an [Hoogwijk et al., 2003]). Enfin, dans le champ de l'utilisation des produits, la part des déchets de l'industrie du bois non valorisée représente un potentiel apparemment sous-utilisé, le plus aisé à mobiliser à court terme.

La production d'énergie à partir de biomasse est généralement une fonction secondaire, sauf dans le cas des plantations établies dans ce but (taillis à courte rotation). Ainsi, plusieurs types de forêts sont potentiellement utilisables pour le bois énergie [Richardson et al., 2002] : (i) forêts naturelles, à fort potentiel de production de bois d'oeuvre, mais faible potentiel de production de bois énergie – sauf résidus de récolte – du fait de la forte valeur ajoutée du bois d'oeuvre par rapport à celle du bois énergie, (ii) peuplements régénérés naturellement, à faible potentiel en bois d'oeuvre de qualité, (iii) plantations établies pour la production de bois d'oeuvre ou de fibres, (iv) forêts récréatives, pour lesquelles la production de bois énergie est généralement accessoire, et (v) systèmes agroforestiers, notamment dans les pays en développement, où la production de bois énergie est généralement une fonction supplémentaire. L'établissement de forêts pour des usages combinés permettrait des taux de boisement importants et un potentiel global de stockage supérieur.

La capacité annuelle de stockage de carbone des écosystèmes forestiers est significative, relativement aux flux anthropiques émis. Elle a certaines limites : une forêt mature ne stocke plus et le maintien du stock sur le long terme nécessite d'être garanti. Le développement progressif du bois énergie, conjointement avec le stockage, permet de s'affranchir de ces limites, et de rendre économiquement plus intéressante une action de stockage. À grande échelle, la production de bois énergie, « bonifiant » la capacité annuelle de stockage, semble une des orientations les plus réalistes pour économiser au mieux les réserves énergétiques fossiles, dans le cadre d'une utilisation rationnelle et d'une minimisation des émissions de gaz à effet de serre.

Toutefois, cette capacité est trop longue à mobiliser pour être seule efficace, sauf à adopter des programmes de boisement très ambitieux, au détriment possible d'autres types d'allocations des terres, *e.g.* les terres agricoles. C'est assez dire qu'il faut tirer parti de tous les moyens de lutte contre l'intensification de l'effet de serre. C'est ce type de stratégie optimale qui traduira dans la réalité les ingrédients du cercle vertueux des usages conjoints des forêts : stockage, bonification énergie, maîtrise des consommations fossiles, modération des émissions.

6.6.3 Modes d'actions et marges de manoeuvre

À l'échelle globale, il est difficile d'estimer avec précision un potentiel pour l'utilisation du bois énergie. Ce type d'estimation nécessite de connaître, ou d'apprécier un taux de pénétration du bois énergie sur le marché de l'énergie, qui dépend de nombreux paramètres et dont l'estimation sort du champ de cette étude.

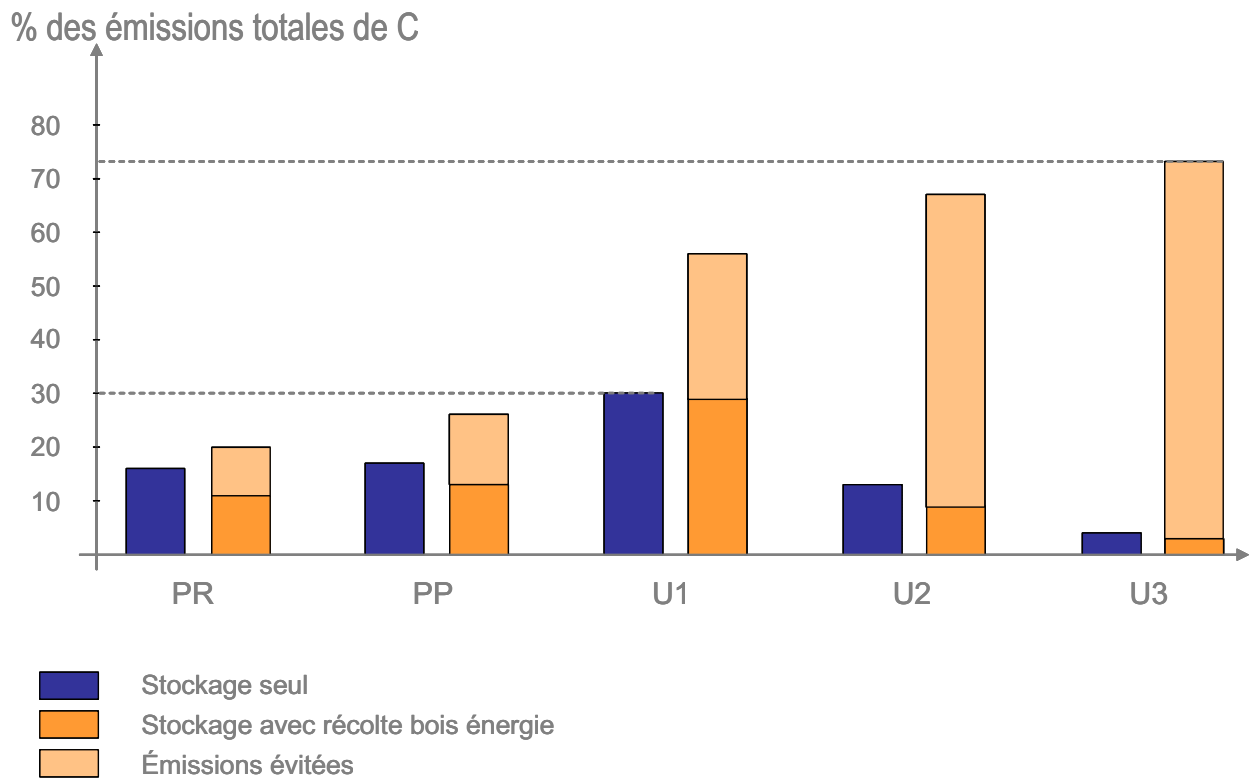


Figure 6. 16 - Effet de bonification du bois énergie par rapport au seul stockage de carbone.

Cependant, un certain nombre de recommandations peuvent être énoncées, à la lumière des études de cas présentées. Tout d'abord, il apparaît clairement que l'effet de bonification du bois énergie par rapport au seul stockage de carbone rend son utilisation particulièrement intéressante à la fois pour contribuer au principe d'économie déjà évoqué précédemment, puisqu'il permet d'économiser des combustibles fossiles, et pour contribuer aux principes de précaution, par son action sur la limitation de l'augmentation des émissions de carbone dans l'atmosphère.

Plusieurs voies sont envisageables pour la gestion des forêts dans le but de produire du bois énergie : la valorisation des déchets représente un potentiel intéressant, de même que la production conjointe de bois énergie et de bois d'œuvre. Les taillis à courte rotation, ou plus généralement les plantations de bois exclusivement à usage énergétique, sont également intéressants et il conviendrait de faire une comparaison entre ce potentiel et celui, par exemple, d'autres cultures énergétiques, comme les plantes annuelles.



Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) couvre en France une surface de 0,9 Mha.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1 BILAN DES PRINCIPALES CONTRIBUTION DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

7.1.1 Les potentiels

L'objectif de ce travail est de présenter la problématique de l'utilisation des écosystèmes forestiers pour la lutte contre l'intensification de l'effet de serre, sous l'angle de l'énergéticien.

Dans un contexte général où les consommations d'énergie vont croissant, et où le recours massif aux énergies fossiles semble incontournable à court ou moyen termes, l'étude du système que constituent les écosystèmes forestiers à l'échelle globale est indispensable à plusieurs titres :

- il est maintenant bien reconnu qu'ils constituent déjà des puits de carbone, dans la mesure où ils absorbent lors de leur croissance, une partie des émissions anthropiques annuelles de carbone,
- la gestion de cette capacité naturelle permet donc de contribuer à la limitation de l'intensification de l'effet de serre, par l'augmentation du stockage existant, que ce soit en augmentant les surfaces productives de forêt, en préservant les stocks déjà constitués ou en gérant les écosystèmes en place pour augmenter le stock sur pied,
- les écosystèmes forestiers constituent par ailleurs, une ressource énergétique intéressante, déjà largement mobilisée à l'échelle globale, mais dont le potentiel supplémentaire d'utilisation demeure significatif,
- le surcroît d'énergie externe apporté au système constitué par les forêts pour leur gestion et pour les transformations successives du bois en produits divers permet, dans la mesure où les conditions de réalisation sont contrôlées, d'améliorer globalement la fonction de stockage de carbone.

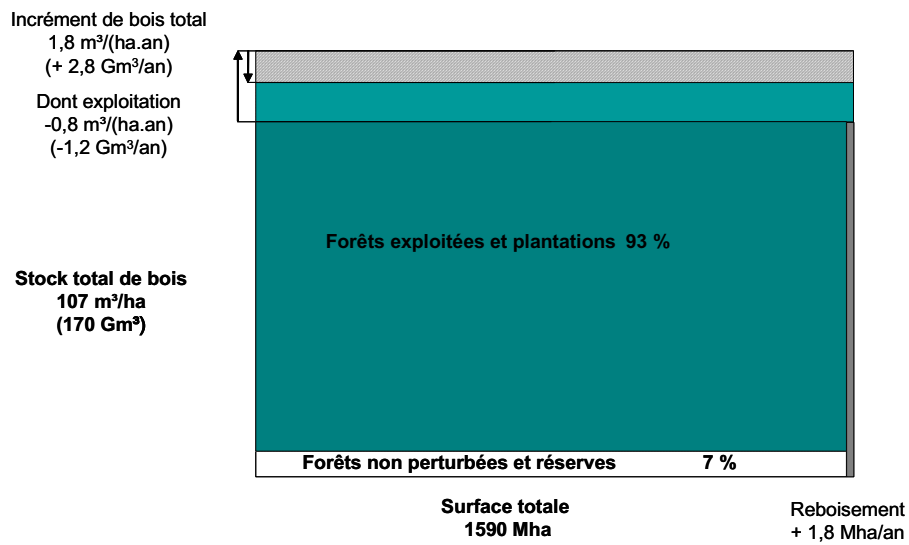
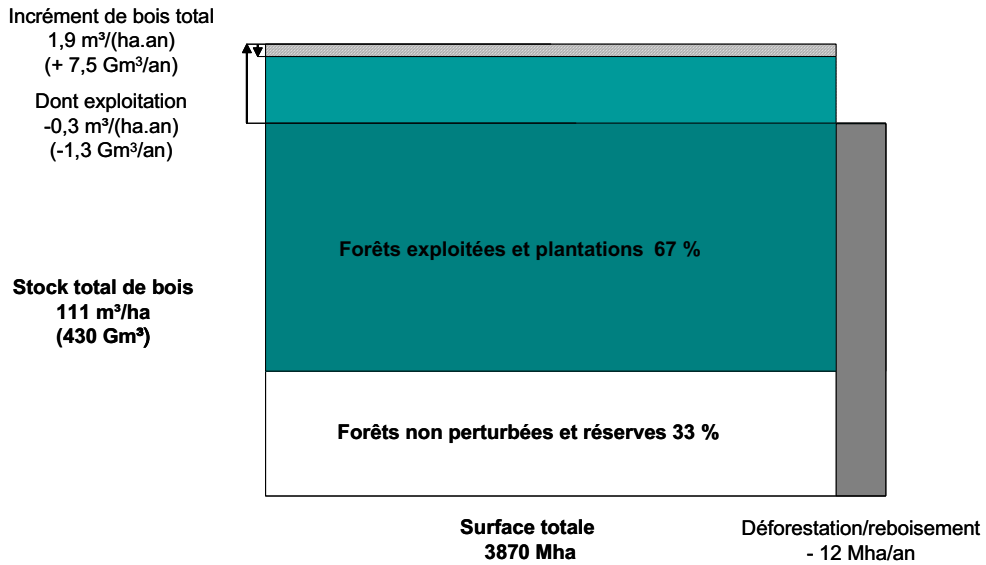
Malgré les nombreuses incertitudes qui pèsent sur les différentes données utilisées, notamment sur les consommations spécifiques d'énergie externe, sur les durées de vie des produits du bois et sur les surfaces disponibles, il est possible d'estimer des marges de manœuvre sur la situation existante et sur les potentiels de stockage supplémentaire.

Les principaux potentiels se situent :

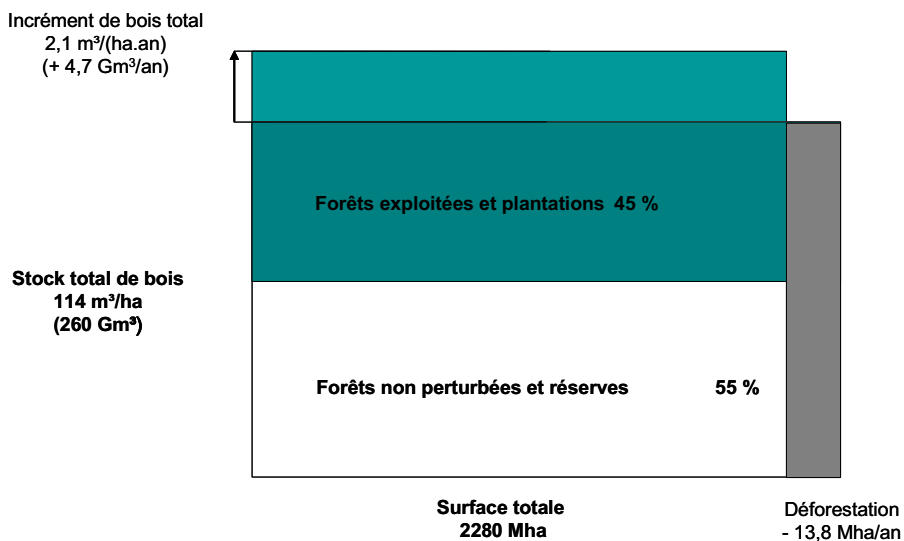
- dans les déplacements des équilibres existants des filières bois actuelles, notamment par l'amélioration de la valorisation des déchets en fin de vie, qui pourrait augmenter jusqu'à environ 7 % le stockage de la filière complète,
- dans la généralisation de l'usage du bois énergie, en cohérence avec le point précédent, pour diminuer les émissions dues à l'utilisation des énergies fossiles (la substitution peut permettre d'éviter jusqu'à 2,1 t C/tep_{utile}),
- dans le développement d'usages combinés des forêts, à la fois pour diminuer le coût de stockage de carbone et pour en augmenter le potentiel par l'accroissement des surfaces disponibles.

Par ailleurs, le potentiel d'augmentation de la production de bois matériau à l'échelle mondiale est important (Figure 7. 1), puisque seulement 24 % environ de la production annuelle de bois est utilisée dans les seules forêts déjà perturbées.

Figure 7. 1 - Un bilan possible des stocks de bois sur pied et de leurs variations, pour le monde, les pays développés (a) et les pays en développement (b).



(a)



(b)

7.1.2 Les facteurs limitants

Toutefois, les potentiels des écosystèmes forestiers à l'échelle globale sont contraints par différents facteurs limitants, de nature et d'ampleur diverses. Une classification de ces facteurs limitants peut regrouper cinq grandes classes de contraintes :

- les contraintes biologiques, qui définissent un potentiel maximal pour chaque espèce d'arbre, éventuellement modifiable par la sélection ou l'amélioration génétique,
- les contraintes pédo-climatiques, liées à la qualité des sols, à l'ensoleillement, à la disponibilité en eaux et en nutriments divers, et qui peuvent être éventuellement déplacées par de bonnes pratiques de gestion des sols et d'entretien des forêts,
- les contraintes démographiques, qui diminuent les surfaces potentiellement disponibles pour l'établissement de nouvelles forêts, du fait des besoins pour l'alimentation humaine, ces contraintes étant difficilement prévisibles, dans la mesure où elles dépendent beaucoup du scénario d'alimentation retenu et notamment de la part carnée de cette alimentation (pour un même apport énergétique, une alimentation carnée nécessitera pratiquement 10 fois plus de surface),
- les contraintes économiques, dont les impacts se situent sur plusieurs plans, comme la destruction des forêts primaires pour la production de bois précieux, la répartition entre les différents usages du bois, ou encore le potentiel maximum de pénétration des produits du bois sur le marché,
- les contraintes autres que technico-économiques, notamment organisationnelles, institutionnelles, politiques, sociologiques et culturelles, dont l'influence là encore est importante pour la mise en place de certaines filières, comme le bois énergie [CLIP, 1998].

Par ailleurs, les incertitudes concernant les nombreux paramètres nécessaires à l'estimation de ces potentiels sont encore mal maîtrisées, sauf pour certains facteurs renseignés depuis déjà longtemps, notamment les facteurs d'émissions relatifs aux consommations d'énergie fossile.

7.2 LA GESTION DES FORÊTS, UN ÉLÉMENT INCONTOURNABLE D'UNE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE ET DE GESTION DES GAZ À EFFET DE SERRE

7.2.1 Stockage de carbone

Il n'en reste pas moins que, malgré les nombreux facteurs limitants évoqués, la gestion des écosystèmes terrestres constitue, en l'état actuel des connaissances, le seul mode de capture et stockage du carbone diffus dans l'atmosphère, qui représente une part équivalente ou même supérieure aux émissions annuelles de carbone dit concentré, c'est-à-dire récupérable par les méthodes de stockage géologique. Bien entendu, dans la mesure où ils constituent le stock de biomasse terrestre le plus important, les écosystèmes forestiers sont, parmi les différents types d'écosystèmes, particulièrement adaptés à ce type de stockage.

Comme il l'a été montré au fil de cette étude, l'aptitude des forêts au stockage de carbone se situe à la fois dans l'écosystème sur pied, tant dans la biomasse que dans la matière organique du sol, et dans les éventuels produits issus du bois récolté.

Tableau 7. 1 - Récapitulatif des études de cas et de leurs principales caractéristiques, spatiales, temporelles et vis-à-vis des objectifs principaux du peuplement.

Les caractéristiques spatiales correspondent à une échelle locale (L), régionale (R), ou globale (G)
 Les caractéristiques temporelles sont relatives à un régime transitoire (T), un régime établi (RE) ou à un déplacement d'une situation à l'équilibre (DE)
 Enfin, les objectifs sont soit stockage seul de carbone (O1), soit production de bois matériau (O2) soit production de bois énergie (O3).

	Caractéristiques spatiales	Caractéristiques temporelles	Objectifs
Cas I	L-R	T-RE	O1
Cas II	L-R	T-RE	O1 (O2-O3)
Cas III	R	RE-DE	O2
Cas IV	L	T	O3
Cas V	L	T-RE	O3 (O2)
Cas VI	L	T-RE	O3 (O2)
Cas VII	G	T	O1-O3

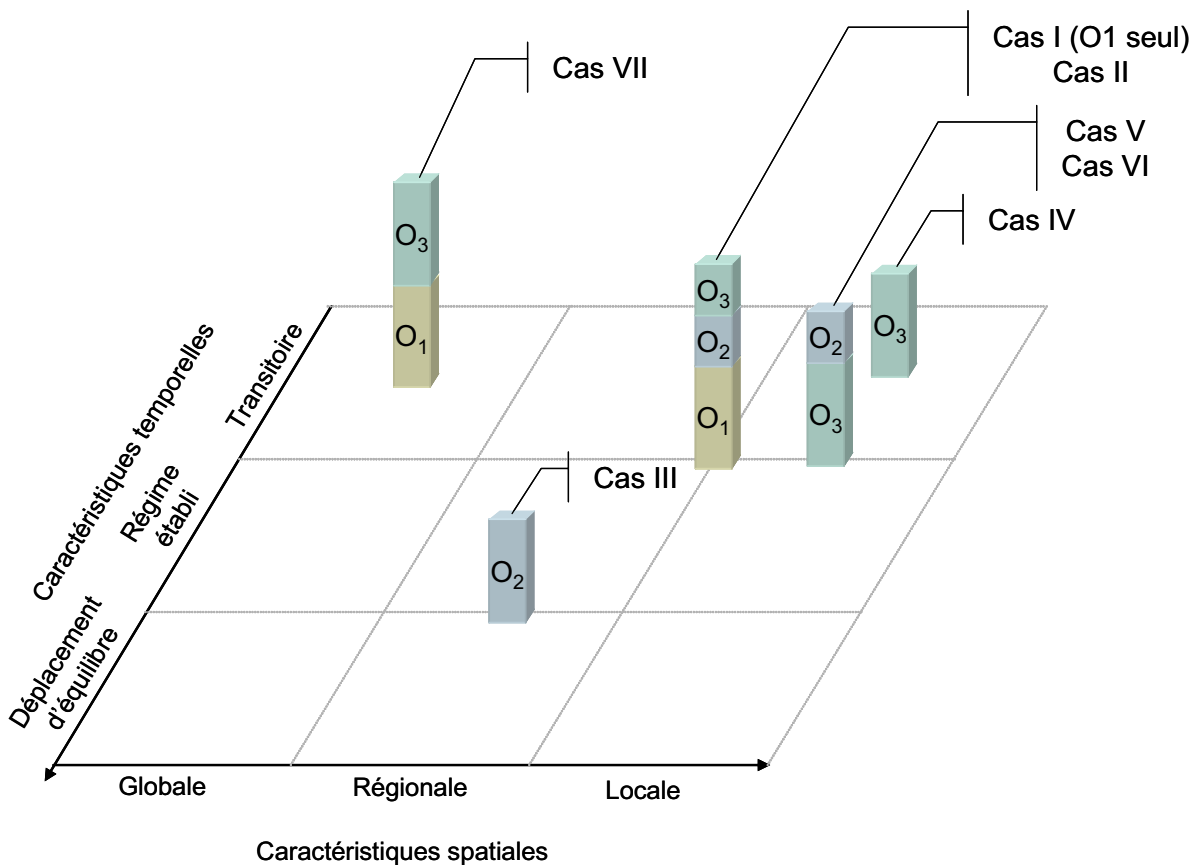


Figure 7. 2 - Tessellation partielle de l'espace des configurations possibles par les différentes études de cas.

L'estimation d'un potentiel à l'échelle globale dépend de nombreux paramètres, principalement la surface disponible, le rendement par hectare et l'utilisation qui est faite du bois, en particulier la durée de vie des produits fabriqués.

Il convient de noter également la complexité des systèmes naturels que constituent les forêts et la difficulté de modélisation qui en découle. Les potentiels de stockage des écosystèmes forestiers dépendent, comme il l'a déjà été souligné, de nombreux paramètres, dont les interactions sont parfois encore mal connues, notamment en ce qui concerne les dynamique de décomposition de la matière organique du sol, et donc des échanges de carbone entre le sol et l'atmosphère.

7.2.2 Effets de substitution

À l'aptitude stricte des ressources forestières au stockage de carbone s'ajoute la capacité de substitution du bois, lorsqu'il est utilisé pour la production d'énergie ou comme matériau, en remplacement de produits dont la fabrication est plus coûteuse en énergie (notamment l'aluminium, le ciment, ...).

S'ils ne constituent pas des effets de stockage à proprement parler, les effets de substitution n'en sont pas moins importants dans la problématique générale de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et peuvent dans certaines configurations avoir une influence plus importante que n'en a la constitution d'un stock de carbone supplémentaire. Ainsi, par exemple, à l'échelle globale, cette étude a pu montrer le bénéfice sur la capacité de réduction des émissions de carbone qu'apporte l'utilisation du bois pour la production d'énergie par rapport à l'utilisation d'une même surface pour la constitution d'un stock de carbone en forêt sans exploitation, donc sans valorisation du bois. Cette bonification du bois énergie est comprise entre 20 et 73 %, selon les scénarios de disponibilité des ressources fossiles carbonées. Par ailleurs, dans le cas de l'utilisation du bois énergie, les émissions liées à la mise en forme du combustible ne représentent qu'une fraction de l'ordre de 5 % des émissions évitées.

Cette étude s'est concentrée principalement sur l'effet de substitution directe, laissant de côté la substitution indirecte des matériaux. Une prise en compte complémentaire de cet effet est indispensable pour évaluer de façon exhaustive l'effet de l'usage du bois sur le cycle global du carbone. Cependant, cette prise en compte nécessite des études affinées des possibilités de substitution et la constitution de bases de données étoffées des quantités d'émissions de gaz à effet de serre évitées du fait de l'utilisation du bois matériau, par exemple dans les filières construction ou ameublement.

7.3 PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS MÉTHODOLOGIQUES DES ÉTUDES DE CAS

7.3.1 Une démarche possible : l'analyse du cycle de vie

S'il est possible de démontrer simplement que l'établissement d'une forêt non exploitée après plantation sur une surface non initialement boisée permet de stocker du carbone, l'estimation de la contribution d'un système plus complexe, constitué d'un peuplement exploité et de la filière bois induite est plus délicate. Il convient en effet dans ce cas non seulement de prendre en compte le stockage dans les produits du bois, mais encore de tenir compte de toutes les émissions dues à la consommation d'énergie fossile au fil des transformations, ainsi que du devenir des déchets de transformation et de la fin de vie des produits.

Encadré 7. 1 - De l'intérêt des réflexions multifonctions sur les écosystèmes forestiers.

Un exemple d'agroforesterie : plantation de bois précieux et élevage dans le nord Massif Central.

Le terme d'agroforesterie désigne des régimes d'aménagement qui consistent à intégrer délibérément les plantes vivaces ligneuses, c'est-à-dire les arbres principalement, à la culture de la terre, à l'élevage, ou au deux, sur une même unité d'aménagement du territoire [CIPRA, 1991]. Elle est très largement pratiquée par les populations rurales, notamment dans les pays en voie de développement. Dans ces situations, les arbres entiers (feuilles, pousses, bois, écorce et racines) sont utilisés pour répondre à de nombreux besoins de la vie quotidienne, que ce soit pour l'approvisionnement en combustible, l'affouragement du bétail, la construction d'habitations, d'outils ou de moyens de transport fluviaux. Par ailleurs, les arbres permettent de maintenir une certaine fertilité au sol pour les autres cultures.

Mais des études conjointes du CEMAGREF et de l'INRA portent sur l'adaptation de tels systèmes au cas des pays développés. Ces études consistent en la mesure des potentiels agroforestiers de plusieurs essences de feuillus précieux et du mélèze, associés à des élevages, ovins ou bovins. L'intérêt de ces configurations est principalement d'associer un revenu régulier, celui de l'élevage, à un revenu à long terme, par la production de bois à haute valeur marchande. Par ailleurs, ce type de système agroforestier peut présenter d'autres avantages, comme le maintien d'une activité agricole sur des terrains destinés à l'abandon ou à des plantations forestières classiques, la diversification de l'activité agricole et de l'utilisation de l'espace, l'aménagement du territoire et du paysage et enfin la création d'abris pour la faune [Balandier, 1995].

L'intérêt en termes de stockage de carbone de tels systèmes est évident, dans la mesure où ils permettent de mobiliser plus de surface pour la plantation de forêts et donc permette de résoudre partiellement la contrainte forte liée aux conflits d'utilisation des sols entre l'agriculture et la sylviculture.

Un exemple d'utilisation des écosystèmes forestiers comme outil de gestion des eaux : le cas de la ville de Munich.

Les écosystèmes forestiers ont des impacts positifs sur la qualité de l'eau, du fait de leur fonctionnement biologique, mais aussi du fait qu'ils constituent des espaces sur lesquels l'intervention humaine est limitée, en comparaison avec les zones urbaines et les terres agricoles [Lavabre et Andréassian, 2000], même si par ailleurs les forêts diminuent la ressource disponible en eau. Les principaux impacts positifs des forêts sur les ressources en eau sont la limitation des crues, la protection des sols, la réduction de la turbidité de l'eau et des concentrations en éléments dissous et enfin le développement de la vie aquatique.

Dès lors, il est envisageable de combiner une fois encore plusieurs fonctions d'usage des forêts, et d'augmenter les surfaces potentiellement disponibles pour l'établissement de nouvelles terres boisées. Plusieurs voies d'action permettrait de combiner les deux objectifs que sont gestion des eaux et stockage de carbone par l'utilisation des zones boisées : amélioration des modes de sylviculture et d'exploitation, en vue de diminuer les impacts des forêts, tant sur le plan des émissions de gaz à effet de serre que sur celui des émissions dans l'eau ; établissement de zones de forêt en transition entre les milieux pollués et les cours d'eau ; préservation des haies...

Des exemples d'application de ce type de réflexions existent, comme par exemple à Munich, où une démarche a été menée depuis 1870, à l'échelle du bassin versant, en intégrant les fonctions des écosystèmes forestiers et l'exploitation de la ressource en eau.

Une démarche, développée depuis plus d'une trentaine d'années pour l'analyse des impacts environnementaux des produits industriels, permet d'aborder globalement ce problème : l'analyse du cycle de vie. La logique générale de cette démarche permet d'appréhender la problématique dans son ensemble, avec un souci d'exhaustivité dans l'inventaire des flux de carbone impliqués dans le système. Par ailleurs, les techniques préconisées dans le cadre de cette méthodologie s'appliquent en partie au problème étudié ici. En revanche, il est nécessaire d'adapter l'analyse du cycle de vie sur certains points, notamment sur :

- la prise en compte de la dynamique dans l'analyse du système,
- et sur la définition de l'unité de référence pour la comptabilisation des flux.

L'étude réalisée n'est pas à proprement parler une analyse du cycle de vie, dans la mesure où tout d'abord, elle se concentre sur les flux d'énergie et de carbone, et leurs conséquences sur l'effet de serre, et laisse de côté les autres impacts environnementaux. Par ailleurs, les études de cas présentées se placent à différentes échelles de temps et d'espace (Figure 7. 2), et prennent en compte plusieurs unités fonctionnelles différentes. Les grands principes de l'ACV sont cependant conservés et permettent de donner un cadre méthodologique à un problème où entrent en jeu de nombreuses données de nature et de sources différentes.

7.3.2 La forêt : un système multifonctions

Le travail présenté ici s'est concentré sur trois fonctions importantes des forêts : le stockage du carbone, la production de bois matériau et la production de bois énergie. Mais il y a lieu de prendre en compte d'autres fonctions d'usage des forêts, qu'il s'agisse de fonctions environnementales, de fonctions sociétales ou de services environnementaux industriels ou collectifs.

La combinaison de plusieurs fonctions permet d'ailleurs dans certaines configurations de satisfaire des contraintes, notamment les contraintes de conflits d'usage des sols, les contraintes de potentiel biologique, ou les contraintes économiques. Il en est ainsi de l'agroforesterie qui sur une même surface permet de combiner la sylviculture et l'agriculture ou l'élevage, et de l'utilisation de plantations pour la remédiation ou le traitement des eaux.

La question de la biodiversité est dans cette perspective également particulièrement intéressante, car son rôle sur la capacité d'un écosystème à stocker du carbone est important. Les deux objectifs de stockage de carbone pour le stockage de carbone et pour la conservation de la biodiversité ne sont en effet pas contradictoires, mais vont dans le même sens : c'est ce que montrent plusieurs études, estimant que la productivité d'un écosystème est d'autant meilleure que le nombre d'espèces en présence est important [Baskin, 1994 ; Vilà et al., 2003 ; Huston et Marland, 2003], même s'il est difficile de déterminer quantitativement un optimum du nombre d'espèces au-delà duquel la compétition inter-spécifique neutralise tout effet d'accroissement de la biomasse voire même conduit à une diminution de la production de biomasse.

7.3.3 Les applications : les logiques projet

Si les estimations d'un potentiel à l'échelle globale sont délicates, c'est que l'incertitude sur les contraintes aux échelles locales est grande. L'intérêt de l'approche de cette étude est qu'elle propose une grille de lecture homogène, applicable à des configurations variées et hétérogènes. Mais dans l'application proposée ici, les données restent imprécises, dans la mesure où elles sont issues de la bibliographie, et pas mesurées sur des études de cas de terrains définies.

Encadré 7. 2 - Quelques remarques sur les nouveaux usages du bois

Il a été montré que le stockage de carbone peut être significativement augmenté par le développement de nouveaux usages du bois matériau. Le bois bénéficiant d'une image positive en terme d'environnement, certains nouveaux usages apparaissent, où le bois remplace des matériaux comme l'aluminium, beaucoup plus consommateurs d'énergie.

Il en va ainsi des utilisations du bois dans les ouvrages de génie civil (ponts en particulier), dans l'habitat, notamment avec le développement des démarches de type Haute Qualité Environnementale, ou pour le remplacement de l'aluminium dans certains usages (bords de route...). D'autres usages plus innovants apparaissent également, par exemple au travers de produits en bois permettant d'absorber jusqu'à 97 % des ondes radio dans les gammes typiques des GSM [Bois-Forêt Info, 2002].

L'intérêt du développement de nouvelles utilisations du bois est de participer à l'augmentation du stockage de carbone par un déplacement du pseudo-équilibre de la filière à l'échelle mondiale : de nouvelles utilisations peuvent à la fois augmenter le stock lui-même, si leurs durées de vie sont supérieures à la durée de vie moyenne des produits existants, ou permettre de diminuer les émissions anthropiques de carbone par le remplacement de matériaux très émetteurs.

Il est donc important d'aborder la problématique dans une logique « projet », c'est-à-dire tout d'abord à une échelle opérationnelle, intégrant les contraintes locales et les données précises.

L'estimation du potentiel à l'échelle globale ne peut se faire avec précision que par une agrégation de tous les potentiels locaux, cette méthode se rapprochant des méthodes d'inventaire ascendantes décrites dans le deuxième chapitre de ce document.

7.4 EN GUISE DE CONCLUSION

7.4.1 Définition d'une ingénierie de stockage de carbone

La présente étude permet d'aborder les premiers éléments de définition d'une ingénierie du stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers, qu'il conviendrait de compléter par des études complémentaires, et en particulier des études de terrain. Les points suivants constituent une base de départ, sur laquelle pourrait s'appuyer tout projet de stockage de carbone utilisant les écosystèmes forestiers :

- la première étape peut être la définition des objectifs de stockage, exprimés soit comme un flux annuel de stockage, soit comme un stock cumulé sur une période de référence,
- la deuxième étape concerne bien sûr la définition du mode de gestion retenu parmi les grands types jalonnés par les études de cas, c'est-à-dire stockage seul, stockage avec production de bois matériau ou stockage avec production de bois énergie,
- et enfin, il convient, en parallèle des deux autres étapes, de prendre connaissance des contraintes de terrain et notamment de réaliser l'estimation de la surface disponible pour le projet.

Pour une même région, le stockage sur pied est assez peu dépendant des espèces plantées, qui seront choisies plutôt en fonction de l'usage souhaité du bois dans le cas où la plantation est exploitée. Si elle n'est pas exploitée, les critères de choix des espèces peuvent porter sur d'autres fonctions des forêts, comme par exemple les usages récréatifs et cynégétiques, l'agroforesterie...

Enfin, l'ingénierie de stockage de carbone doit prendre en compte toute la mise en place de la filière ou le déplacement d'équilibre des flux dans la filière si l'action choisie consiste dans la modification d'une filière existante. Dans ce cas, un scénario prospectif doit être défini, qui sera vérifié et validé ou infirmé a posteriori, une fois le projet mis en place.

Toutes ces démarches sont indispensables pour s'assurer de l'efficacité du projet en termes de stockage de carbone : le gain ne pourra être défini que par rapport à une situation de référence sans projet. Le calcul a priori du stockage est donc relativement incertain, dans la mesure où les effets induits du projet sont difficilement prévisibles, d'où la nécessité d'un suivi sur le terrain et de mesures des flux échangés après la mise en place du projet.

7.4.2 Mise en œuvre opérationnelle

L'ingénierie du stockage de carbone nécessite encore d'être définie dans la mise en œuvre opérationnelle de tels projets. En particulier, il convient d'identifier les différents acteurs susceptibles d'intervenir dans ce type d'actions, ainsi que leurs rôles respectifs.

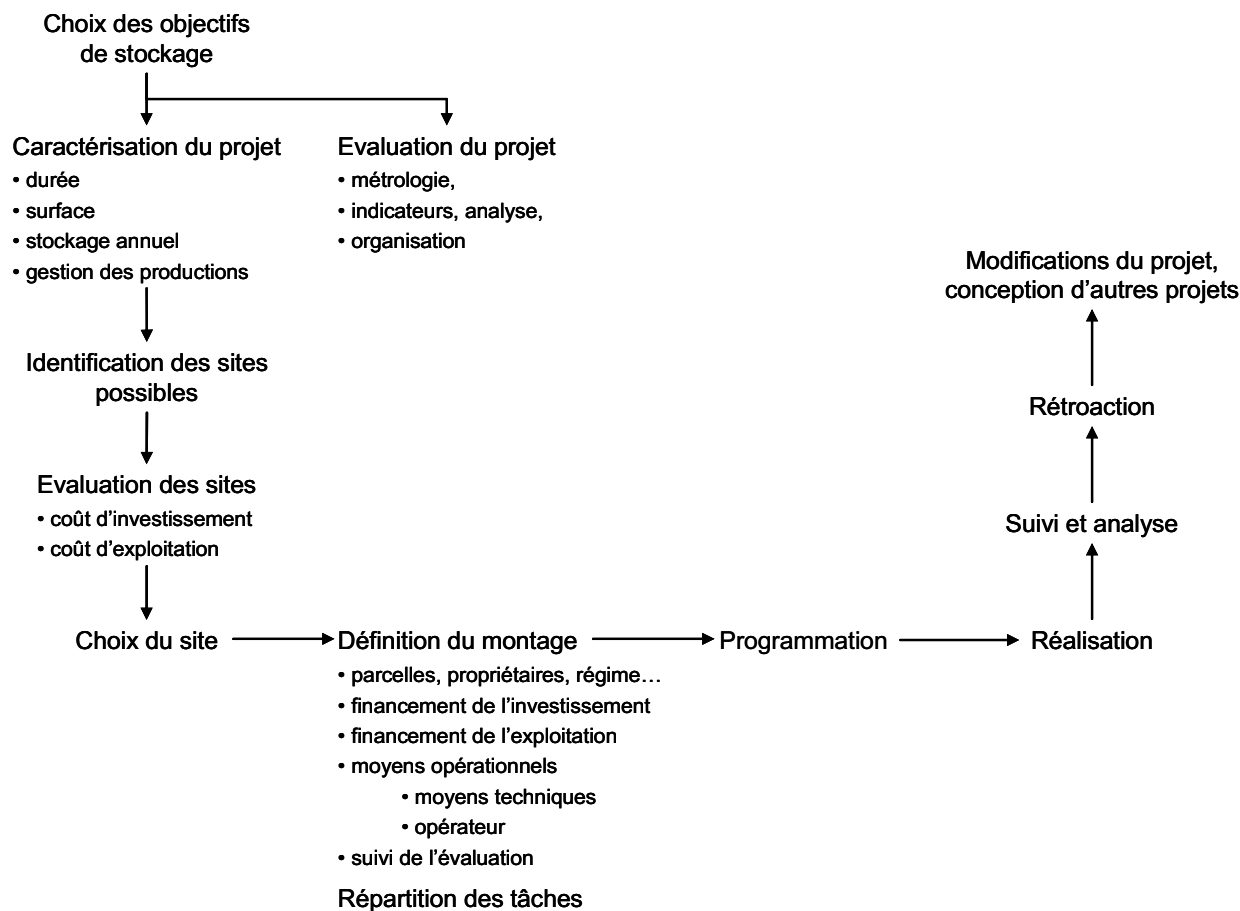


Figure 7. 3 -Une possibilité de démarche pour la définition d'un projet de stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers et leurs filières bois.

Si dans certaines configurations, la mise en place de tels projets peut s'avérer simple, notamment quand le maître d'ouvrage acquiert une certaine surface pour réaliser son projet, des potentiels importants pourraient se situer dans des régions où de telles acquisitions ne sont pas aisées. Ainsi, peu de projets de stockage de carbone ont été mis en place dans les régions développées, principalement du fait que les crédits d'émissions liés au stockage en forêt ne sont pas accordés pour ces zones. Cependant, il pourrait s'avérer intéressant de définir des actions de terrains, impliquant tout à la fois les propriétaires forestiers, les collectivités locales, les universitaires et les industries, pour étendre le potentiel d'actions sur l'intensification de l'effet de serre.

7.4.3 Prise en compte des effets à l'échelle globale

Actuellement, la prise en compte formelle des écosystèmes forestiers à l'échelle mondiale pour leur contribution à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre apparaît minimale.

- Dans le cadre du protocole de Kyoto en effet, seul le stockage supplémentaire sur pied, lié à une plantation nouvelle, et la substitution du bois énergie à des énergies fossiles carbonées sont pris en compte.
- La comptabilisation de la contribution des produits du bois est en effet délicate, du fait du manque de données sur les durées de vie de ces produits, ce qui rend l'estimation des stocks très incertaine, et à cause de la comptabilisation indispensable des émissions complètes de carbone sur le cycle de vie des produits, qui à l'échelle du globe demanderait une méthodologie d'inventaire complexe et lourde à mettre en œuvre.

Au-delà du seul aspect de la comptabilisation formelle des contributions des forêts et de leurs ressources à la stabilisation de l'effet de serre, il convient de ne pas perdre de vue ce dernier objectif réel : ce qui importe en effet est bien de capturer et de stocker le carbone par tous les moyens possibles, qu'ils soient ou non pris en compte dans des réflexions politiques globales. En revanche, complémentaiement, pour tout projet local ou régional, ou pour toute approche quantitative régionale ou globale, il est possible de mettre en œuvre aux échelles locales un certain nombre de principes. Ces principes, basés sur une meilleure utilisation des ressources forestières, permettent de gérer au mieux le système « Surface Terrestre – Atmosphère », un espace forcément borné, et participent à la mise en œuvre d'une volonté de rendre vivable cet espace dans l'avenir par une meilleure homogénéité des ressources et une meilleure gestion des différents flux de matière et d'énergie. Ces toutes dernières remarques, se situent bien dans une certaine vision, un monde plus acceptable pour tous. Elles ont, sans aucun doute, une portée plus vaste que le seul horizon, à court et moyen termes, qui a été évoqué ici et gardent tout leur sens même en envisageant, sur le long terme, une redistribution importante des vecteurs actuels de production d'énergie, voire des formes nouvelles qui pourraient émerger.

RÉFÉRENCES

▪ RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADEME/DERF, 1998 - Analyse du cycle de vie de la production de peuplier sur pied, rapport de la société Ecobilan.

ALAZARD N. et MONTADERT L., 1993 - Ressources pétrolières pour le 21ème siècle : quel avenir ?, Revue de l'I.F.P., 48 69-82.

ALBRECHT A., KANDJI S.T., 2003 - Carbon sequestration in tropical agroforestry systems, Agriculture, Ecosystems & Environment, 99, 15-27.

ALPERN B. et LEMOS DE SOUSA M.J., 2002 - Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels ; coal: definitions, classifications, reserves-resources, and energy potential, Coal Geology, 50, 3-41.

APPS M.J., KURZ W.A., BEUKEMA S.J., BHATTI J.S., 1999 - Carbon budget of the Canadian forest product sector, Environmental Science and Policy 2, 25-41.

ARROUAYS D., BALESSENT J., GERMON J.C., JAYET P.A., SOUSSANA J.F. ET STENGEL P., 2002 - Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? Expertise scientifique collective INRA.

BALANDIER P., 1995 - Potentialités agroforestières de six essences pour le nord Massif Central, étude du CEMAGREF, Riom.

BARAL A. et GUHA G.S., 2004 - Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit, Biomass and Bioenergy 27, 41-55.

BASKIN Y., 1994 - Ecologists dare to ask : how much does diversity matter ?, Science 264, 202-203.

BATTJES J.J., 1994 - Global options for biofuels from plantations according to IMAGE simulations, Groningen, The Netherlands.

BERNDES G., HOOGWIJK M. et VAN DEN BROEK R., 2003 - The contribution of biomass in the future global energy supply : a review of 17 studies, Biomass & Bioenergy 25, 1-28.

BLANC I. et LABOUZE E., 1999 - Analyse du cycle de vie. Évaluation de la qualité des données. Techniques de l'Ingénieur G5750, Traité de Génie Industriel, rubrique Environnement vol.A 9.

BONNET J.F., 1998 - Les apports solaires implicites dans les activités humaines. Thèse de Doctorat de l'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Talence.

BONNET J.F., 2001 - Les biomasses contrôlées par l'Homme à l'échelle mondiale : alimentation de la population, impacts sur l'effet de serre..., Congrès Génie des Procédés, Nancy, 2001.

BONNET J.F. et COMBARNOUS M., 1996 - Du rayonnement solaire à la production de biomasse végétale : une vision schématique des flux d'énergie, Revue Générale de Thermique, 35, 527-542.

BONNET J.F. et COMBARNOUS M., 2001 - Conversion du rayonnement solaire dans la production de biomasse végétale et animale. Une vision schématique des flux d'énergie, Entropie 233, 3-11.

BÖRJESSON P., et GUSTAVSSON L., 2000 - Greenhouse gas balances in building construction : wood versus concrete form life-cycle and forest land-use perspectives, Energy policy, 20, 575-588.

BP, 2004 - BP Statistical Review of World Energy, Juin 2004.

BRAY J. et GORHAM E., 1964 - Litter production in forests of the world, Advances in Ecological Research 2, 101-157.

BROWN, S., SATHAYE J., CANNELL, M., KAUPPI, P.E., 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. Dans: R.T.WATSON, M.C.ZINYOWERA et R.H.MOSS (éd.), Climate change 1995 : impacts, adaptations and mitigation of climate change:scientific analyses. Contribution du Ile Groupe de travail au deuxième rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge University Press, Cambridge.

BUCHANAN A.H. et LEVINE S.B., 1999 - Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions, Environmental Science & policy 2, 427-437.

BUCKET E., 2004 – comm.. pers.

- BURGER J.A., 2002 - Soil and long-term site productivity values, in RICHARDSON J., BJÖRHEDEN R., HAKKILA P. LOWE A.T. et SMITH C.T., 2002 - Bioenergy from sustainable forestry, Guiding principles and practice, Kluwer Academic Publishers.
- CANNELL M.G.R., 2003 - Carbon sequestration and biomass energy offset : theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK, Biomass & Bioenergy 24, 97-116.
- CASEAU P., 2002 - Analyses des Cycles de Vie et écologie Industrielle, Rapport à l'Académie des Technologies, Paris.
- CAUSTON D.R., ELIAS C.O. et HADLEY P., 1978 - Biometrical studies of plant growth, Plant, Cell and Environment 1, 163-184.
- CHANTAL M., 2001 - Estimation du stock de carbone dans la biomasse de Pins Maritimes du massif Landais, rapport de DEA, Université Bordeaux IV.
- CLIP, 1998 - Le bois énergie en Europe, Cahiers du CLIP 8.
- COLE, C.V., J. DUXBURY, J. FRENEY, O. Heinemeyer, K. MINAMI, A. Mosier, K. PAUSTIAN, N. ROSENBERG, N. SAMPSON, D. SAUERBECK, et Q. ZHAO, 1996 - Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. R.T. WATSON, M.C. ZINYOWERA, R.H. MOSS, et D.J. DOKKEN (eds.), Cambridge University Press.
- COMBARNOUS M. et PRIEUR A., 2003 - Les consommations d'énergie dans le monde : une méthode robuste de prévision de leur évolution à moyen terme, premières conséquences, C.R. Géoscience, 335, 943-950.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, 1998 - Énergie 2010-2020, Paris.
- COOPER C.F, 1983 - Carbon storage in managed forests, Canadian Journal of Forest Research 13, 155-166.
- CTBA, 1998 - Analyse du cycle de vie de la palette Europe.
- CTBA, 2002 - Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois.
- DAMERON V., 2004 - Les enjeux du stockage biologique de CO₂ et de la substitution d'énergies fossiles par les biomasses dans le monde, rapport provisoire pour le CLIP.
- DE JONG B.H.J., TIPPER R., MONTOYA-GOMEZ G., 2000 - An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico, Ecological Economics 33, 313-327.
- DE JONG B.H.J., 2001 - Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management, Forest Ecology and management 154, 85-104.
- DEWAR R.C., 1991 - Analytical model of carbon storage in the trees, soils, and wood products of managed forests, Tree Physiology 8, 239-258.
- DEWAR R.C. et CANNELL M.G.R., 1992 - Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples, Tree Physiology 11, 49-71.
- DIXON R.K. et TURNER D.P., 1991 - The global carbon cycle and climate change: Responses and feedbacks from below-ground systems Environmental Pollution 73, 245-262.
- DIXON R.K, WINJUM J.K et SCHROEDER P.E., 1993 - Conservation and sequestration of carbon. The potential of forest and agroforest management practices, Global Environmental Change 3, 159-173.
- DIXON R.K. et al., 1994 - Carbon pools and flux of global forests ecosystems, Science, 263, 185-190.
- DOE (US Dept of Energy), 1999 - Carbon Sequestration Research and Development" Report DOE/SC/FE-1.
- EBERT T.A., 1980 - Estimating parameters in a flexible growth equation, the Richards function, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, 687-692.
- EDMONDS J.A., WISE M.A., SANDS R.D., BROWN R.A. et KHESHGI H., 1996 - Agriculture, land-use, and commercial biomass energy : a preliminary integrated analysis of the potential role of biomass energy for reducing future greenhouse related emissions, Pacific Northwest National Laboratory.
- ELSAIED M.A., Matthews R. et MORTIMER N.D., 2003 - Carbon and energy balances for a range of biofuels options, rapport DTI Sustainable Energy Programmes, projet n° B/B6/00784/REP.
- ETEMAD B. et LUCIANI J., 1991 - World Energy Production 1800-1985, Geneva: Libraire DROZ.
- EUROSTAT, 2002 - Renewable energy sources statistics in the EU, Iceland and Norway, 2002.
- FALLOON P, SMITH P, SZABÓ J et PÁSZTOR L, 2002 - Comparison of approaches for estimating carbon sequestration at the regional scale, Soil Use and Management 18, 164-174.
- FAO, 1997 - Situation des Forêts du Monde 1997, FAO, Rome.
- FAO, 2000 - Évaluation des Ressources Forestières 2000, FAO, Rome.

- FAO, 2001 - Évaluation des Ressources Forestières 2001, Rome.
- FISCHER G. et SCHRATTENHOLZER L., 2001 - Global bioenergy potentials through 2050, *Biomass and Bioenergy* 20, 151-159.
- FONTELLE J.P., 2003 - Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques, Rapport du CITEPA, Réf. CITEPA 494 / Convention MATE 26 / 2001.
- FRANKLIN W.E. et KUSKO B.H., 1998 - Analyse du cycle de vie. Réalisation de l'inventaire, Techniques de l'Ingénieur G5500, *Traité de Génie Industriel*, rubrique Environnement vol. A9.
- FRÜHWALD A., WEGENER G, KRÜGER S. et BEUDERT M., 1994 - Holz – ein Rohstoff des Zukunft nachhaltig verfügbar und umwelt gerecht, Informationsdienst Holz, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V.
- GIRALDO L. et HYMAN B., 1996 - An energy process-step model for manufacturing pape rand paperboard, *Energy*, 21, 667-681.
- GITZ V. et CIAIS P., 2003 - Effets d'amplification du changement d'usage des terres sur le taux de CO₂ atmosphérique, *C.R. Géosciences* 335, 1179-1198.
- GOEDKOOP M., 1998 - Analyse du cycle de vie. Logiciel Simapro. Techniques de l'Ingénieur G5780, *Traité de Génie Industriel*, rubrique Environnement vol. A9.
- GOODALE C.L., APPS M.J., BIRDSEY R.A. et al., 2002, Forest carbon sinks in the northern hemisphere, *Ecological applications* 12, 891-899.
- Gurney K.R., LAW R.M., DENNING A.S. et al., 2002 - Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models, *Nature* 415, 626-630.
- HALL D.O., F. ROSILLO-CALLE, R.H. WILLIAMS, et J. WOODS, 1993 - Biomass for Energy: Supply Prospects, In: T.B. Johansson, et al., Editors. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Washington, D.C.: Island Press.
- HOOGWIJK M., FAAIJ A., VAN DEN BROEK R., BERNDES G., GIELEN D. et TURKENBURG W., 2003 - Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy, *Biomass & Bioenergy* 25, 119-133.
- HOUGHTON R.A., 2003 - Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different ?, *Global Change Biology* 9, 500-509.
- HUSTON M.A. et MARLAND G, 2003 - Carbon management and biodiversity, *Journal of Environmental Management* 67, 77-86
- IGBP Terrestrial Carbon Working Group, 1998 - The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science*, 280, 1393 – 1394.
- IPCC, 1996 - Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T., M.C. Zinyowera, and R.H. Moss (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 880 pp.
- JANCOVICI J.M., 2003 - Bilan carbone d'une activité industrielle ou tertiaire, rapport à l'ADEME.
- JARVIS P.G., 1989 - Atmospheric carbon dioxide and forests, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B 324, 369-392.
- JEAN-BAPTISTE P., 2002 - Potentiel des méthodes de séparation et stockage du CO₂, Colloque Interacadémique Académie des sciences, Académie d'agriculture de France et Académie des technologies, 16-18 septembre 2002.
- JEAN-BAPTISTE P., et DUCROUX R., 2003 - Potentiel des méthodes de séparation et stockage du CO₂ dans la lutte contre l'effet de serre, *Comptes-Rendus Geoscience* 335, 611-625.
- JOHANSSON, T.B., H. KELLY, A.K.N. REDDY, et R.H. WILLIAMS, 1993 - A renewables-intensive global energy scenario (appendix to Chapter 1), In: T.B. JOHANSSON, et al., Editors. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Washington, D.C.: Island Press.
- JONES I.S.F., 1996 - Enhanced Carbon Dioxide Uptake by the World's Oceans, *Energy Conversion Management*, 37, 1049-1052.
- JONES I.S.F. et OTAEGUI D., 1997 - Photosynthetic greenhouse gas mitigation by ocean nourishment, *Energy Conversion Management*, 38, S367-S372.
- JUNGMEIER G., MCDARBY F., EVALD A., HOHENTHAL C., PERTERSEN A.K., SCHWAIGER H.P. et Zimmer B., 2003 - Energy aspects in LCA of forest products, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8, 99-105.
- KARJALAINEN T. et al., 1994 - Role of Wood-Based Products in Absorbing Atmospheric Carbon, *Silva Fennica* 28(2), 67-80.
- KARJALAINEN T. et al., 1999 - Scenarios for the carbon balance of Finnish forests and wood products, *Environmental Science and Policy*, 2, 165-175.

- KAUPPI, P. E., SEDJO, R. A., APPS, M. J., CERRI, C. C., FUJIMORI, T., JANZEN, H., KRANKINA, O. N., MAKUNDI, W., MARLAND, G., MASERA, O., NABUURS, G. J., RAZALI, W. et RAVINDRANATH, N. H., 2001 - Technical and economic potential of options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. In B. METZ, O. DAVIDSON, R. SWART, et J. PAN, eds. *Climate change 2001 : Mitigation*. pp. 310-343. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Cambridge University Press.
- KHALIFA K., 1999 - Analyse du cycle de vie : Problématique de l'évaluation des impacts, *Techniques de l'ingénieur*, G 5610.
- KOSLOWSKI T.T., KRAMER P.J. et PALLARDY S.G., 1991 - *The physiological ecology of woody plants*, Academic Press.
- KURPICK P., KURPICK U. et HUTH A., 1997 - The influence of logging on a Malaysian dipterocarp rain forest : a study using a forest gap model, *Journal of Theoretical Biology* 185, 47-54.
- LAL R., KIMBLE J.M., FOLLET R.F., et COLE C.V., 1998 - *The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*, Chelsea, Sleeping Bear Press.
- LANLY J.P., 1997 - *Forestry and woodland resources*, Volume 1, XI World Forestry Congress 13 to 22 October 1997, Antalya, Turkey.
- LASHOF, D.A. et D.A. TIRPAK, eds., 1990 - *Policy options for stabilizing global climate*. Hemisphere Publishing Corporation: New York, Washington, Philadelphia, London.
- LAVABRE J. et ANDRÉASSIAN V., 2000 - *Eaux et forêts – La forêt, un outil de gestion des eaux ?*, CEMAGREF éditions.
- LAZARUS, M., L. GREBER, J. HALL, C. BARTELS, S. BERNOW, E. HANSEN, P. RASKIN, et D. VON HIPPEL, 1993 - *Towards a Fossil Free Energy Future*. Stockholm Environmental Institute - Boston Center: Boston.
- LEEMANS, R., A. VAN AMSTEL, C. BATTJES, E. Kreileman, et S. TOET, 1996 - The land cover and carbon cycle consequences of large-scale utilizations of biomass as an energy source. *Global Environmental Change*, 6, 335–357.
- LÉRIDON H., 2003 - Certitudes et Incertitudes de la prévision démographique, *Comptes-Rendus Geoscience*, 335, 627-635.
- LISKI J. et al., 2001 - Which rotation length is favourable to carbon sequestration ?, *Canadian Journal of Forest Research*, 31, Issue 11, 2004-2013
- LOCHU S., 2002 - *Méthodologie de l'évaluation et de l'éligibilité des stocks de carbone en aval de la forêt*, Rapport au CTBA.
- LOISEAUX J.-M., DAVID S., HEUER D. et NUTTIN A., 2002 - La filière thorium, une option intéressante pour le nucléaire du futur, *Comptes-Rendus Physique*, 3, 1023-1034.
- LUTZ W., SANDERSON W. et SCHERBOV S., 2001 - The end of the world population growth, *Nature*, 412, 543-545.
- MCDONALD G.J., 1990 - The future of methane as an energy source, *Annual Review of Energy*, 15, 53-83.
- MALHI Y. et al., 1999 - The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests, *Plant, Cell and Environment*, 22, 715-740.
- MALHI Y. et GRACE J., 2000 - Tropical forests and atmospheric carbon dioxide, *Tree*, 15, Issue 8, 332-337.
- MALHI Y., PHILLIPS O., KRUIJT B. et al., 2001 - The magnitude of the carbon sink in intact tropical forests: results from recent field studies, in Sixth international carbon dioxide conference, extended abstracts, Tohoku University, Sensai, Japon.
- MALFAIT J.J., PAJOT G. et POINT P., 2003 - Le puits de carbone Landais, 7^{ème} Colloque Arbora, Pessac, France, 16 et 17 décembre 2003.
- MÉGEVAND, C., 2001 - *Fixation du carbone pour lutter contre l'effet de serre : analyse économique et politique*, mémoire de DEA, Université Paris X-Nanterre, école doctorale d'économie et de mathématiques de Paris Ouest.
- MELILLO, J.M., MCGUIRE A.D., KICKLIGHTER D.W., MOORE B., VOROSMARTY C.J., et SCHLOSS A.L., 1993 - Global Climate Change and Terrestrial Net Primary Production, *Nature* 363, 234-240.
- MISSFELDT, F. et HAITES. E., 2001 - The potential contribution of sinks to meeting Kyoto Protocol commitments, *Environmental Science and Policy* 4, 269-292.
- NABUURS G.J. et MOHREN G.M.J., 1993 - *Carbon Fixation through Forestation Activities*, IBN Research Report 93/4, Face/Institute for Forestry and Nature Research, Wageningen, Pays-Bas.
- NADEAU J.P. et PUIGGALI J.R., 1995 - *Séchage, des processus physiques aux procédés industriels*, Lavoisier, Paris.
- NAKICENOVIC, N., A. GRUBLER, et A. MCDONALD, 1998 - *Global energy perspectives: International Institute for Applied Systems Analysis/World Energy Council*. Cambridge University Press.

- NILSSON, S. & SCHOPFHAUSER, W., 1995 - The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change* 30, 267–293.
- PALUMBO A. V., J. F. MCCARTHY, J. E. AMONETTE, L. S. FISHER, S. D. WULLSCHLEGER et W. LEE DANIELS, 2004 - Prospects for enhancing carbon sequestration and reclamation of degraded lands with fossil-fuel combustion by-products, *Advances in Environmental Research* 8, 425-438.
- PINGOUD K., PERÄLÄ A.L. et PUSSINEN A., 2001 – Carbon dynamics in wood products, *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 6, 91-111.
- PLATTNER G.K., JOOS F. et STOCKER T.F., 2002 - Revision of the global carbon budget due to changing air-sea oxygen fluxes, *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1096, doi:10.1029/2001GB001746.
- PRIEUR A. ET COMBARNOUS M., 2003 - Forêts et cycles de vie : aspects énergétiques, produits, carbone stocké. Congrès Forestier Mondial, Québec, 21-28 septembre 2003.
- PRIEUR A. ET RAUCH E., 2003 - Carbon sequestration in forest ecosystems and gas industry : sustainable development and clean energy production from fossil fuel, 22^{ème} Congrès Mondial du Gaz, Tokyo, 1-5 juin 2003.
- PUHE J. et ULRICH B., 2001 - *Global climate change and human impact on forest ecosystems*, Springer Verlag.
- RICHARDSON J., BJÖRHEDEN R., HAKKILA P., LOWE A.T. et SMITH C.T., 2002 - *Bioenergy from sustainable forestry, Guiding principles and practice*, Kluwer Academic Publishers.
- RICHTER K., 1998 – Life cycle assessment of wood products, *in* KOHLMAIER G.H., WEBER M. et HOUGHTON R.H., 1998 - Carbon dioxide mitigation in forestry and wood products, Springer.
- RIEMER P., 1996 - Greenhouse Gas Mitigation Technologies, an Overview of the CO₂ Capture, Storage and Future Activities of the IEA Greenhouse Gas R&D Programme, *Energy conversion and management* 37, 665-670.
- ROBERT M. et SAUGIER B., 2003 - Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C.R. Géoscience* 335, 577-595.
- ROUSSEAUX P., 1998 - Analyse du cycle de vie. Évaluation des impacts, *Techniques de l'Ingénieur G 5605. Traité de Génie Industriel, rubrique Environnement vol. A9.*
- ROUSSEAUX P. et APOSTOL T., 2000 - Valeur environnementale de l'énergie, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- SAMPSON, R.N., R.J. SCHOLLES, C. CERRI, L. ERDA, D.O. HALL, M. Handa, P. Hill, M. Howden, H. JANZEN, J. KIMBLE, R. LAL, G. Marland, K. MINAMI, K. Paustian, P. READ, P.A. SANCHEZ, C. SCOPPA, B. Solberg, M.A. TROSSERO, S. TRUMBORE, O. VAN CLEEMPUT, A. Whitmore, et D. XU, 2000 - Additional Human-induced Activities – Article 3.4. In *Land Use, Land-use Change, and Forestry*. In R.T. Watson, I.R. NOBLE, B. BOLIN, N.H. RAVINDRANATH, D.J. VERARDO, et D.J. DOKKEN (eds.), *A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- SCHNEIDER F., CHEVALIER J. et NAVARRO A., 1998 - Analyse du cycle de vie. Problèmes d'affectation, *Techniques de l'Ingénieur G5550, Traité de Génie Industriel, rubrique Environnement vol. A9.*
- SCHIMEL D.S., 1995 - Terrestrial ecosystems and the carbon cycle, *Global change biology* 1, 77-91.
- SIST P., NOLAN T., BERTAULS J.G. et DYKSTRA D., 1998 - Harvesting intensity versus sustainability in Indonesia, *Forest Ecology and Management* 108, 215-260.
- SMIL V., 1991 - *General Energetics. Energy in the Biosphere and Civilization*, Wiley, New York.
- SMITH P., 2004 - Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context, *European Journal of Agronomy* 20, 229-236.
- SOHNGEN, B. et R. SEDJO. 2000 - Potential Carbon Flux from Timber Harvests and Management in the Context of a Global Timber Market, *Climatic Change*. 44, 151-172.
- SOKONA Y., RIEDACKER A. et NGNIKAM E., 1998 - Une grille d'analyse pour évaluer l'efficacité de diverses actions destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre, *Bulletin africain, bioressources, énergie, développement, environnement*, 10, 4-11.
- SORENSEN, B., 1999- Long-term scenarios for global energy demand and supply: Four global greenhouse mitigation scenarios. Roskilde University, Institute 2, Energy & Environment Group, Denmark.
- SWISHER, J. et D. WILSON, 1993 - Renewable energy potentials. *Energy*, 18, 437–459.
- THOMPSON D. et MATTHEWS R., 1989 - CO₂ in trees and timber lowers greenhouse effect, *Forestry and British timber*, 19-24.
- TREXLER, M.C. et C. HAUGEN, 1994 - Keeping it green: evaluating tropical forestry strategies to mitigate global warming, Institut pour les ressources mondiales, Washington D.C.
- VENTÈRE J.P., 1998 - Conception écologique des produits. *Techniques de l'Ingénieur G6000, Traité de Génie Industriel, rubrique Environnement vol. A9.*

VILÀ M., VAYREDA J., GRACIA C. et IBAÑEZ J.J., 2003 - Does tree diversity increase wood production in pine forests?, *Oecologia*, 135, 299-303.

WARRING R.H. et RUNNING S.W., 1998 - *Forest Ecosystems : analysis at multiple scales*, Academic Press, 2^{ème} édition.

WEC, WORLD ENERGY COUNCIL, 1998 - *Survey of Energy Resources 1998* World Energy Council, London, 1998.

WIGLEY T.M.L. et SCHIMMEL D.S., 2000 - *The Carbon Cycle*, Cambridge University Press.

WILLIAMS, R.H., 1995 - Variants of a low CO₂-emitting energy supply system (LESS) for the world: Prepared for the IPCC Second Assessment Report Working Group IIa, Energy Supply Mitigation Options. Pacific Northwest Laboratories.

WINJUM J.K. et SCHROEDER P.E., 1997 - Forest plantations of the world: their extent, ecological attributes, and carbon storage, *Agricultural and Forest Meteorology*, 84, 153-167.

ZHANG X.Q. et XU D., 2003 - Potential carbon sequestration in China's forests, *Environmental Science And Policy* 6, 421-432.

▪ AUTRES SOURCES DE DONNÉES CONSULTÉES

NORMALISATION

ISO 14040, 1997 - *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*.

ISO 14041, 1998 - *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire*.

ISO 14042, 2000 - *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Évaluation de l'impact du cycle de vie*.

ISO 14043, 2000 - *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie*.

BASES DE DONNÉES

FAOSTAT FAO

<http://www.fao.org>

OCDESTAT OCDE-IEA

<http://www.iea.org/stat.htm>

BASES DE DONNÉES DU LOGICIEL SIMAPRO

ETH-ESU 96 System processes

ETH-ESU 96 Unit processes

BUWAL250

AUTRES

BP (British Petroleum) Statistical Review of World Energy

<http://bp.com>

EIA (Energy Information Agency)

<http://eia.doe.gov/index.html>

FAO WAICENT

<http://www.fao.org>

IFN (Inventaire Forestier National)

<http://www.ifn.fr>

USDA Economics and Statistics System Reports

<http://mann77.mannlib.cornell.edu/reports/>

WRI (World Resources Institute)

<http://wri.org/wri/index.html>

Bois forêt info

www.boisforet-info.com

LISTE DES ILLUSTRATIONS

▪ FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 - Consommations d'énergie primaire dans le monde, en 2002 (soit pour une population de 6,2 Ghab).

Figure 1.2 - Consommations individuelles d'énergies conventionnelles dans le monde, les pays en voie de développement et les pays développés.

Figure 1.3 - Évolution des principales consommations explicites mondiales entre 1970 et 2002.

Figure 1.4 - Origine des 7,5 Gt de carbone provenant, pour l'année 2002, des combustibles fossiles, soit en CO₂, environ 27,6 Gt/an.

Figure 1.5 - Cycle du carbone dans trois compartiments du systèmes « STA » (le système complet comprend aussi les océans) : l'atmosphère, la biomasse végétale terrestre et les combustibles fossiles.

Figure 1.6 - Répartition des émissions mondiales de CO₂ entre émissions diffuses et émissions concentrées, pour un total de 7,5 Gt C/an (2002).

Figure 1.7 - Répartition des émissions françaises de CO₂ entre émissions diffuses et émissions concentrées. En 2002, le total des émissions s'élevait à 554 Mt CO₂.

Figure 1.8 - Évolution des émissions de dioxyde de carbone par habitant depuis 1800, exprimées en t CO₂/hab.

CHAPITRE 2

Figure 2.1 - Stocks (Gt C) et flux (Gt C/an) de carbone dans les seules forêts et dans tous les compartiments du système « Surface terrestre – atmosphère ».

Figure 2.2 - Stock et flux de carbone dans un écosystème forestier (boisement non exploité) : Accroissements Annuels Courant (AAC) et Moyen (AAM).

Figure 2.3 - Bilan des utilisations du bois dans le monde, des déchets résultants et de la part estimée des déchets recyclée dans la filière trituration (R), en Mt C/an.

Figure 2.4 – Les différents compartiments modélisés dans la dynamique de croissance des forêts [Dewar, 1991].

Figure 2.5 – Profil de croissance de la biomasse forestière, d'après [Burger, 2002].

Figure 2.6 – Typologie des méthodes d'évaluation des flux et stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers.

Figure 2.7 – Estimations de l'incrément potentiel du flux de stockage de carbone mobilisable par les écosystèmes forestiers dans le monde.

Figure 2.8 – Estimations de l'incrément potentiel de stock de carbone mobilisable par les écosystèmes forestiers dans le monde.

Figure 2.9 – Estimations des flux de carbone potentiellement stockés dans les écosystèmes forestiers et des surfaces supplémentaires à boiser que leur correspondent, pour différents horizons temporels.

CHAPITRE 3

Figure 3.1 - Surface boisée totale en France par type national de formation végétale.

Figure 3.2 - Les diverses fonctions des forêts et leur répartition en fonction de l'échelle des besoins remplis par ces fonctions.

Figure 3.3 - Les différentes échelles d'espace impliquées dans un projet de stockage de carbone dans les forêts.

Figure 3.4 - Les différentes échelles de temps impliquées dans un projet de stockage de carbone dans les forêts..

Figure 3.5 - Liens entre les échelles d'espace et conséquences sur la modélisation.

Figure 3.6 - Les étapes et la structure d'une Analyse du Cycle de Vie. D'après [ISO 14040, 1997].

Figure 3.7 – Les étapes d'un écobilan.

Figure 3.8 - Diagramme des flux de matières et d'énergie pour l'analyse du cycle de vie d'un produit. D'après Kusko et Franklin, 1998.

Figure 3.9 – Symboles utilisés dans les schémas opérationnels décrivant chaque cas d'étude.

Figure 3.10 – Détail des flux pour l'opération de séchage.

Figure 3.11 – Schéma opérationnel de l'utilisation des forêts de peuplier pour la production de palettes.

Figure 3.12 – Schéma de la démarche proposée.

Figure 3.13 – Influence du temps sur le stockage de carbone. Cas d'un peuplement indigène non exploité en Amazonie.

CHAPITRE 4

Figure 4.1 – Schéma de principe du stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers : flux et accumulation de carbone.

Figure 4.2 – Schéma opérationnel de l'utilisation des forêts pour le seul stockage de carbone (Cas I et II).

Figure 4.3 – Mobilisation d'énergie dans la biomasse au fil des étapes de transformation.

Figure 4.4 – Flux de carbone dans la biomasse au fil des étapes de transformation.

Figure 4.5 – Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la fabrication de panneaux.

Figure 4.6 – Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la fabrication de papier et carton.

Figure 4.7 – Énergie primaire cumulée : cas où le bois d'éclaircie est utilisé pour la production de bois énergie.

Figure 4.8 – Répartition des consommations d'énergie primaire externe pour chacune des utilisations du bois d'éclaircies.

Figure 4.9 – Répartition des émissions de carbone par type d'énergie primaire externe, dans le cas II.

Figure 4.10 – Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé comme énergie.

Figure 4.11 – Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé pour le papier.

Figure 4.12 – Évolution du C accumulé au fil des étapes de transformation (sur le régime transitoire) : forêt moyenne en Europe occidentale, avec éclaircies tous les 10 ans (début à 20 ans) dont le bois est utilisé pour les panneaux.

CHAPITRE 5

Figure 5.1 – Une répartition réelle possible des utilisations du pin maritime en Aquitaine, pour l'année 2000.

Figure 5.2 – Productions et utilisations de pin maritime en Aquitaine : les flux et leur répartition en Mt de bois par an.

Figure 5.3 – Schéma opérationnel du cas III : production et utilisations de pin maritime en Aquitaine.

Figure 5.4 – Variation du contenu énergétique du bois aux divers stades de transformation, depuis le flux d'énergie disponible sur la surface de futaie de pin maritime du massif des Landes d'Aquitaine (0,85 Mha) jusqu'à l'utilisation énergétique de la biomasse.

Figure 5.5 – Variation du contenu en carbone du bois aux divers stades de transformation, depuis le flux capturé lors de la production primaire brute par l'écosystème jusqu'à la répartition entre les produits finis.

Figure 5.6 – Consommations spécifiques d'énergie à chaque opération de la filière pin maritime en Aquitaine.

Figure 5.7 – Cumul des consommations d'énergie au fil de la transformation du pin maritime en Aquitaine.

Figure 5.8 – Émissions spécifiques de carbone à chaque opération de la filière pin maritime en Aquitaine.

Figure 5.9 – Cumul des émissions de carbone au fil de la transformation du pin maritime en Aquitaine.

Figure 5.10 – Répartition des consommations d'énergie primaire externe dans la filière pin maritime en Aquitaine, entre les différentes phases de transformation du bois.

Figure 5.11 – Répartition des émissions de carbone externes dans la filière pin maritime en Aquitaine, entre les différentes sources d'énergie utilisées.

CHAPITRE 6

Figure 6.1 – Les différents modes de production d'énergie à partir du bois.

Figure 6.2 – Répartition des consommations annuelles d'énergie dans le monde : (a) nucléaire, (b) charbon, (c) gaz naturel, (d) pétrole, (e) hydraulique et (f) biomasse.

Figure 6.3 – Répartition des consommations annuelles d'énergie issue de la biomasse dans le monde : combustibles liquides, combustibles solides [(a) bois, (b) charbon de bois, (c) résidus de bois, (d) liqueur noire, (e) bagasse], et combustibles gazeux.

Figure 6.4 – Schéma opérationnel des cas IV, V et VI.

Figure 6.5 – Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas IV.

Figure 6.6 – Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas V.

Figure 6.7 – Détail des consommations spécifiques d'énergie pour les opérations relatives au cas VI.

Figure 6.8 – Mobilisation de l'énergie dans la biomasse au fil des étapes de transformation dans les cas IV, V et VI.

Figure 6.9 – Flux de carbone dans la biomasse au fil des étapes de transformation dans les cas IV, V et VI.

Figure 6.10 – Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas IV.

Figure 6.11 – Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas V.

Figure 6.12 – Émissions spécifiques de carbone externe dans le cas VI.

Figure 6.13 – Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas IV).

Figure 6.14 – Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas V).

Figure 6.15 – Variation des quantités de carbone évitées en fonction des installations et des énergies substituées (cas VI).

Figure 6.16 – Effet de bonification du bois énergie par rapport au seul stockage de carbone.

CHAPITRE 7

Figure 7.1 – Un bilan possible des stocks de bois sur pied et de leurs variations pour le monde, les pays développés (a) et les pays en développement (b).

Figure 7.2 – Tessellation partielle de l'espace des configurations possibles par les différentes études de cas.

Figure 7.3 – Une possibilité de démarche pour la définition d'un projet de stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers et leurs filières bois.

▪ TABLEAUX

CHAPITRE 1

Tableau 1.1 – Capacités mondiales estimées de stockage concentré du CO₂.

Tableau 1.2 - Capacités mondiales estimées de stockage diffus du CO₂.

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 – Bilan des ressources forestières et de leur utilisation

Tableau 2.2 – Une nomenclature des paramètres du stockage biologique de carbone.

Tableau 2.3 – Résultats des études de sensibilité sur un peuplement de pin pour les différents paramètres du modèle, d'après Dewar et Cannell, 1992.

Tableau 2.4 – Matrices de conversion d'usage des sols : variations des stocks et flux.

Tableau 2.5 - Différentes estimations du flux de stockage de C naturel existant par les écosystèmes forestiers.

Tableau 2.6 – Valeurs numériques des estimations de la Figure 2.7.

Tableau 2.7 – Valeurs numériques des estimations de la Figure 2.8.

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 - Classification des impacts et leurs échelles.

Tableau 3.2 – Bilan récapitulatif d'ACV de produits en bois.

Tableau 3.3 - Tableau récapitulatif de projets de puits de carbone forestiers et leurs principales caractéristiques.

Tableau 3.4 - Récapitulatif des indicateurs proposés pour la comparaison des performances de différentes configurations de stockage de carbone utilisant les écosystèmes forestiers.

CHAPITRE 4

Tableau 4.1 – Détail des consommations spécifiques d'énergie externe pour chacune des opérations identifiées, par type d'énergie finale utilisée et par unité de référence utilisée dans la littérature ou les sources statistiques.

Tableau 4.2 – Coefficients d'émissions de C primaire par type d'énergie finale utilisée.

Tableau 4.3 – Variation du stockage de carbone en fonction des conditions pédo-climatiques (cas I).

Tableau 4.4 – Variation du stockage de carbone en fonction des conditions pédo-climatiques (cas II).

Tableau 4.5 – Récapitulatif des indicateurs de stockage de carbone pour chaque configuration.

Tableau 4.6 – Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de bois énergie. Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

Tableau 4.7 – Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de papier. Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

Tableau 4.8 – Résultats des calculs de propagation d'incertitudes dans le cas où la biomasse est utilisée pour la production de panneaux. Les émissions sont cumulées depuis la sylviculture jusqu'à l'utilisation du bois.

CHAPITRE 5

Tableau 5.1 – Répartition des surfaces de pin maritime par classes d'âge et stockage résultant.

Tableau 5.2 – Type de modèle et valeurs utilisées pour les durées de vie des produits du bois selon diverses sources.

Tableau 5.3 – Bilan des consommations d'énergie externe pour le cas III.

Tableau 5.4 – Bilan des indicateurs pour le cas III.

Tableau 5.5 – Résultats des calculs de propagation d'incertitudes sur le total des émissions de carbone fossile dans le massif forestier des Landes d'Aquitaine.

CHAPITRE 6

Tableau 6.1 – Caractéristiques des opérations unitaires dans les cas IV, V et VI.

Tableau 6.2 – Récapitulatif des émissions de carbone par unité d'énergie utile pour les combustibles fossiles, d'après Barbier et Whitwam [CLIP, 1998].

Tableau 6.3 – Récapitulatif des émissions de carbone par unité d'énergie utile pour les cas IV, V et VI.

Tableau 6.4 – Bilan des indicateurs pour le cas IV.

Tableau 6.5 – Bilan des indicateurs pour le cas V.

Tableau 6.6 – Bilan des indicateurs pour le cas VI.

Tableau 6.7 – Comparaison des effets du seul stockage et du stockage avec production de bois énergie à l'échelle globale pour différents stocks de combustibles fossiles : réserves prouvées récupérables, prouvées en place et ultimes (à trois niveaux).

CHAPITRE 7

Tableau 7.1 – Récapitulatif des études de cas et de leurs principales caractéristiques, spatiales, temporelles et vis-à-vis des objectifs principaux du peuplement.

▪ ENCADRÉS

CHAPITRE 1

Encadré 1.1 - Les formes d'énergie et les statistiques mondiales.

CHAPITRE 2

CHAPITRE 3

Encadré 3.1 - Répartition des surfaces de forêt en France selon leurs utilisations.

Encadré 3.2 - L'unité fonctionnelle.

Encadré 3.3 - ACV existantes sur les produits du bois.

Encadré 3.4 - Réduction du coût de stockage de carbone par des usages multi-fonctions des forêts ; un exemple : l'utilisation du saule pour els taillis à courte rotation en Suède.

Encadré 3.5 - Le stockage de carbone et la biodiversité ?

Encadré 3.6 - Exemples de projets de puits de carbone existant.

Encadré 3.7 - Critères de définition et d'éligibilité au sens du protocole de Kyoto d'un projet de stockage de carbone : comment prendre en compte les gains de carbone dans la gestion forestière ?

CHAPITRE 4

CHAPITRE 5

Encadré 5.1 – Historique du massif forestier des Landes d'Aquitaine.

CHAPITRE 6

CHAPITRE 7

Encadré 7.1 – De l'intérêt des réflexions multifonctions sur les écosystèmes forestiers.

Encadré 7.2 – Quelques remarques sur les nouveaux usages du bois.

GLOSSAIRE

Bois rond

Le terme de bois rond peut prendre différentes définitions, selon le contexte dans lequel il est utilisé. Il peut désigner, d'une manière très générale, des sections de tiges d'arbres, avec ou sans écorces, et comprend dans ce cas les grumes, billes, pieux, poteaux et autres produits n'ayant pas encore subi leur première transformation industrielle [Forêts Canada, 1988]. Il peut aussi désigner le bois abattu, ébranché, écimé, tronçonné ou non, mais excluant le bois de feu. Dans les statistiques de la FAO, le bois rond désigne tout le bois abattu, récolté et enlevé de la forêt [FAO, 2000].

Climax

Stade ultime d'une succession évolutive de communautés végétales dans un milieu donné, où l'on conçoit que la végétation a atteint une grande stabilité dans sa physiologie et sa composition [Métro, 1975].

Éclaircie

Coupe partielle ou méthode d'espacement pratiquée dans un peuplement non arrivé à maturité, destinée à accélérer la croissance des arbres restants [Ressources naturelles Canada, 1997].

Forêt

Au sens de la FAO, une forêt est une surface boisée de plus de 0,5 ha, dont la couverture est supérieure à 10 % et qui n'est pas utilisée par ailleurs pour d'autres usages (agriculture, zones urbaines...). Les arbres doivent atteindre plus de 5 m à maturité sur site.

Futaie

Peuplement forestier généralement constitué d'arbres issus de semences et que l'on laisse normalement se développer jusqu'à fermeture du couvert [Helms, 1998].

Futaie régulière

Futaie équiennne constituée d'arbres de dimensions voisines, où on s'efforce de favoriser la croissance uniforme des arbres ainsi qu'une régénération sur l'ensemble de la surface en un court laps de temps, de façon à obtenir une suite de peuplements équiennes régulièrement gradués [Conseil international de la langue française, 1998].

Massif

Ensemble d'arbres dont les cimes sont de même hauteur et se touchent.

Peuplement

Ensemble d'arbres ayant une uniformité jugée suffisante quant à sa composition floristique, sa structure, son âge, sa répartition dans l'espace, sa condition sanitaire, etc., pour se distinguer des peuplements voisins, et pouvant ainsi former une unité élémentaire sylvicole ou d'aménagement.

Unité fonctionnelle

Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

NOMENCLATURE

En ce qui concerne les paramètres de croissance des écosystèmes, une nomenclature plus détaillée, contenant notamment les relations entre certains de ces paramètres, est proposée dans le chapitre 2 (Tableau 2.2).

▪ VARIABLES

A	Surface	en m ² ou en ha
b	Densité de biomasse	sans dimension
B	Stock de C de la biomasse	en t m.s. ou en tC
B ₀	Stock initial de biomasse ou de C dans un écosystème	en t m.s. ou en tC
Bl	Biomasse ligneuse	en t m.s. ou en tC
Bla	Biomasse ligneuse aérienne	en t m.s. ou en tC
Bla7-	Biomasse ligneuse aérienne de diamètre < 7 cm	en t m.s. ou en tC
Bla7+	Biomasse ligneuse aérienne de diamètre > 7 cm	en t m.s. ou en tC
Bls	Biomasse ligneuse souterraine (racines)	en t m.s. ou en tC
B _m	Valeur asymptotique du stock de biomasse ou de C	en t m.s. ou en tC
Bnl	Biomasse non ligneuse	en t m.s. ou en tC
Br	Biomasse récoltable	en t m.s. ou en tC
Btr	Biomasse ligneuse du tronc	en t m.s. ou en tC
C	Consommation de biomasse par les herbivores	en t m.s./an ou en tC/an
D	Décomposition	en t m.s./an ou en tC/an
e	Consommation d'énergie externe relative à une opération	en tep ou en MJ
E _{fossile, totale}	Bilan des consommations d'énergie primaire externe	en tep ou en MJ
f _E	Facteur d'expansion	sans dimension
f _C	Fraction massique de carbone dans le bois	en tC/t bois
F _U	Flux utile de carbone	en tC/an
k	Taux de décomposition	en années ⁻¹
L	Chute de litière	en t m.s./an ou en tC/an
L1-	Déchets de durée de vie < 1 an	en t m.s./an ou en tC/an
L1+	Déchets de durée de vie > 1 an	en t m.s./an ou en tC/an
LCM	Litière, consommation, mortalité	en t m.s./an ou en tC/an
M	Mortalité	en t m.s./an ou en tC/an
n	Paramètre de forme dans la fonction de Richards	sans dimension
p	Devant un stock, flux annuel brut relatif à ce stock	en t m.s./an, tC/an ou m ³ /an
P	Stock de produits du bois	en m ³ , en t m.s., ou en tC
PNE	Production nette de l'écosystème	en t m.s./an ou en tC/an
PPB	Production primaire (ou photosynthétique) brute	en t m.s./an ou en tC/an
PPN	Production primaire nette	en t m.s./an ou en tC/an
r	Constante de taux dans la fonction de Richards	sans dimension
R	Respiration	en t m.s./an ou en tC/an
R _a	Respiration autotrophe	en t m.s./an ou en tC/an
R _h	Respiration hétérotrophe	en t m.s./an ou en tC/an
SE	Stock de l'écosystème	en tC

SEs	Stock de C du sol	en tC
t	Temps	en années
t _c	Temps à l'équilibre, soit à 90 % de la production au climax	en années
V	Volume de bois dans les produits relatif à une opération	en m ³ ou m ³ /ha
x	Devant un stock, part exportée ou récoltée de ce stock	en t m.s./an, tC/an ou m ³ /an
β	Fraction de C transférée de la litière au sol	sans dimension
γ	Coefficient d'émissions externes de C relatif à une opération	en tC/MJ ou tC/tep
Γ _{biomasse, total}	Quantité totale de C stockée dans la biomasse sur pied	en tC, tC/an ou tC/ha
Γ _{fossile, total}	Quantité totale de C émise par l'utilisation d'énergie externe	en tC, tC/an ou tC/ha
Γ _{produits, total}	Quantité totale de C stockée dans les produits du bois	en tC, tC/an ou tC/ha
Γ _{stocké, total}	Bilan net de carbone stocké dans une filière	en tC, tC/an ou tC/ha
Γ _{substitution, total}	Quantité totale de C évitée par substitution	en tC, tC/an ou tC/ha
Δ	Devant un stock, variations annuelles nettes de ce stock	en t m.s./an, tC/an ou m ³ /an
ε	Rendement matière relatif à une opération de transformation	en t/t _{bois transformé} , m ³ /m ³ _{bois transformé}
Λ	Valeur asymptotique du taux de litières non ligneuse	en tC/(ha.an)
ρ	Masse volumique du produit à chaque transformation	en t m.s./m ³ ou tC/m ³

▪ INDICES

f	Relatif aux racines fines
l	Relatif au feuillage
b	Relatif aux branches
tr	Relatif au tronc
s	Relatif aux racines d'architecture

▪ NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

AAC	Accroissement annuel courant
AAM	Accroissement annuel moyen
m.s.	Matière sèche
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
STA	Système « Surface terrestre – Atmosphère »
t C	Tonne de carbone

▪ UNITÉS ET MULTIPLES EMPLOYÉS

tep	1 tep = 42 GJ (tonne équivalent pétrole)
Mha	1 Mha = 10 ⁶ ha = 10 ⁴ km ²

▪ OPÉRATIONS UNITAIRES UTILISÉES DANS CHACUNE DES ÉTUDES DE CAS

Cas I

f	sylviculture
f ₁	pépinière
f ₂	préparation du sol et plantation

Cas II

f	sylviculture	s	séchage
f ₁	pépinière	p _{3,1}	fabrication et transport de la pâte à papier
f ₂	préparation du sol et plantation	p _{31,1}	fabrication et transport du papier
h	récolte	p _{3,2}	fabrication et transport de panneaux de bois
p ₁	débardage et transport	p _{31,2}	mise en forme et transport des produits finis issus de panneaux de bois
p ₂	déchiquetage		
t	transport des plaquettes de bois		

Cas III

f	sylviculture	p _{5,2}	utilisation des écorces à usage décoratif
f ₁	pépinière	p _{5,3}	utilisation des écorces à usage énergétique
f ₂	préparation du sol et plantation	p _{23,1}	fabrication et transport de meubles à partir de panneaux
h	récolte	p _{23,2}	fabrication et transport de meubles à partir de sciages
p ₁	débardage et transport	p _{23,3}	fabrication et transport d'autres utilisations de sciages
p ₂	mise à longueur du bois	p _{23,4}	fabrication et transport de palettes et emballages
p _{22,1}	sciage et transport des sciages	p _{23,5}	fabrication et transport de planchers et agencements
p _{21,1}	déroutage et transport du bois déroulé	p _{23,6}	fabrication et transport de bois sciés
p ₃	écorçage du bois de trituration	p _{23,7}	fabrication et transport de portes et fenêtres
p _{31,1}	fabrication et transport de pâte blanche spéciale	p _{23,8}	fabrication et transport de bâtiments préfabriqués
p _{31,2}	fabrication et transport de pâte écru	p _{23,9}	fabrication et transport de charpente
p _{32,1}	fabrication et transport de papier industriel		
p _{32,2}	fabrication et transport de papier kraft		
p _{4,1}	fabrication et transport de panneaux mélaminés		
p _{4,2}	fabrication et transport de panneaux de particules		
p _{4,3}	fabrication et transport de panneaux autres		
p _{4,4}	utilisation énergétique des autres connexes		
p _{5,1}	utilisation autre des écorces		

Cas IV

f	sylviculture	p ₁	débardage et transport
f ₁	pépinière	p ₂	déchiquetage
f ₂	préparation du sol et plantation	s	séchage
h	récolte	e	utilisation du bois énergie

Cas V

f	sylviculture	p ₁	débardage et transport
f ₁	pépinière	p ₂	déchiquetage
f ₂	préparation du sol et plantation	s	séchage
h	récolte	e	utilisation du bois énergie

Cas VI

f	sylviculture	p ₁₂	deuxième transformation du bois et transport
f ₁	pépinière	p ₂	déchiquetage des déchets de récolte
f ₂	préparation du sol et plantation	s	séchage des déchets issus de la récolte et des deux transformations
h	récolte	e	utilisation du bois énergie
p ₁	débardage et transport		
p ₁₁	première transformation du bois et transport		

LES RESSOURCES FORESTIÈRES : PRODUITS DU BOIS, USAGES ÉNERGÉTIQUES, CAPTURE ET STOCKAGE DU CARBONE

L'étude se situe à l'interface de plusieurs champs : ressources forestières, intensification de l'effet de serre et analyse environnementale. Son objet est de proposer une méthodologie d'évaluation et d'évaluer, aux différentes échelles, du potentiel de contribution des forêts et de leur production à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre. Après une présentation des enjeux énergétiques à l'échelle mondiale et de la place des forêts dans le cycle du carbone, différentes méthodes d'analyse environnementale sont présentées, notamment l'Analyse du Cycle de Vie. La démarche proposée, basée sur des principes de l'ACV, est décrite. Des exemples, caractéristiques de la problématique aux différentes échelles, sont ensuite détaillés. Pour chacun, il est proposé un schéma opérationnel des flux d'énergie et de carbone, et des indicateurs de comparaison et des études de sensibilité sur les paramètres pertinents. Finalement, certains grands principes sont dégagés des différents résultats obtenus, et une approche de type « ingénierie » du stockage biologique de carbone est proposée.

Mots clés : ressource forestière, ressources fossiles, bois énergie, bois matériau, capture du CO₂, stockage du CO₂, usages conjoints des forêts, Analyse du Cycle de Vie

FOREST RESOURCES: WOOD PRODUCTS, ENERGY USES, CARBON CAPTURE AND STORAGE

This work is devoted to a study on forest resources and on their uses as energy and wood material, both functions which are coupled with the general problems of the limitation of the anthropogenic greenhouse effect. Its first three chapters are concerned with some global data on the general context of the study, as well as with methodological elements. In the three following chapters detailed case studies are to be found, on which this work is based, and in the final chapter, the main conclusions and perspectives of the work are finally drawn. A certain number of recommendations are stated, based on quantified elements detailed in the various case studies : (i) within the framework of a general reflection on world energy consumptions and their effects on the greenhouse effect intensification, the management of forest ecosystems appears to be an element impossible to circumvent within short or medium terms, (ii) the definition of an engineering of carbon storage in forest ecosystems requires the constitution of a database of various existing cases, but must be based on several principles like the development of the uses of wood for products of long lifespan whose manufacture would require less energy, (iii) the use of wood for energy production is of a particular importance, as well at the global and local scales, insofar as it makes it possible to limit the greenhouse gas emissions while preserving fossil energy resources, (iv) insofar as forests have many various functions, other than the three only evoked through the case studies taken into consideration, it is appropriate to adapt and to generalise the proposed method to the multiple uses of forest ecosystems.

Keywords: forest resource, fossil reserves, wood energy, wood material, CO₂ capture, CO₂ storage, forests combined uses, Life Cycle Assessment