



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1323–1335



COMPTES RENDUS

GEOSCIENCE

<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Le point sur . . .

Les surfaces boisées à l'échelle de la planète : usages conjoints pour la séquestration du carbone et la production d'énergie

Anne Prieur^{a,*}, Jean-François Bonnet^{a,b}, Michel Combarous^a

^a Laboratoire inter-établissements « Transferts, Écoulements, Fluides, Énergétique », UMR CNRS 8508, Esplanade des Arts-et-Métiers, 33405 Talence cedex, France

^b Institut du développement local, BP 32, 47901 Agen cedex 9, France

Reçu le 2 avril 2004 ; reçu en forme révisée le 9 septembre 2004 ; accepté le 21 septembre 2004

Disponible sur Internet le 28 octobre 2004

Présenté par Georges Pédro

Résumé

La contribution des forêts à la lutte contre l'intensification de l'effet de serre est abordée, à l'échelle globale, sous les deux points de vue, parfois considérés comme contradictoires, du stockage de carbone et de la production de bois énergie. Une nomenclature est proposée pour appréhender dans leur totalité les mécanismes impliqués. Elle permet une comparaison des effets respectifs du stockage seul et du stockage avec production de bois énergie. On montre enfin que l'utilisation du bois énergie constitue une « bonification » qui permettrait d'optimiser à moyen et long termes le recours aux réserves de combustibles fossiles. *Pour citer cet article* : A. Prieur et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Forest areas at the global scale: combined carbon sequestration and wood-energy uses. The role of forest ecosystems in the regulation of greenhouse effect at the global scale is developed here, from two points of view, sometimes considered as opposed: carbon storage and wood production for energy. A nomenclature is proposed to understand all the various mechanisms implied in carbon storage. A comparison is made between the effects on carbon emissions of storage alone and storage with wood fuel production. Use of wood energy is proved to be a 'bonus' that could optimise, in the middle and long terms, the use of fossil fuel reserves. *To cite this article*: A. Prieur et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : ressources forestières mondiales ; ressources fossiles ; bois énergie ; capture et stockage de carbone ; usages conjoints du bois

Keywords: world forest resources; fossil reserves; wood energy; carbon capture and storage; combined wood uses

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : anne.prieur@bordeaux.ensam.fr (A. Prieur), jean-francois.bonnet@bordeaux.ensam.fr (J.-F. Bonnet), michel.combarous@bordeaux.ensam.fr (M. Combarous).

Abridged English version

1. Introduction

Carbon storage is one of the possible ways to limit greenhouse gas emissions, due to increasing consumption of fossil fuels in the middle term. Forest ecosystems are to play an important role in storing diffuse carbon, as well as in producing wood energy. The paper addresses combined carbon storage and wood energy production (CCSWE), these two aspects being often studied separately. Two major ways are pointed out: modifying existing forests management, and increasing the potential by planting new forests.

2. Forests at global scale and their interaction with carbon cycle

Forested lands represent the main part of terrestrial biomass, one of the three carbon stocks in the 'earth surface–oceans–atmosphere' system (Fig. 1). Carbon fluxes between oceans and atmosphere are close to those between terrestrial biomass and atmosphere. Anthropogenic emissions are lower, however not compensated by inverse fluxes. Global carbon stock variation is the result of several effects, cumulative or opposed: (i) area variations, (ii) mean density variations. At the global scale, almost half of the round wood production is fuel wood, the other half being used as industrial wood. Due to the low yield of wood transformation, a large volume of waste is produced, some of which being used for energy production or pulpwood (Fig. 2).

3. Carbon storage in forest ecosystems and wood products

Basic concepts need to be described to address forest ecosystems storage potential. The behaviour of an ecosystem depends on various parameters, biological, physical, or chemical, which may vary freely or under human action. Forest management, mainly by the way of harvest, influences forest dynamics.

Storage capability is defined as a net annual biomass (ΔB) or total carbon ($\Delta SE = \Delta B + \Delta SEs$) increment. It depends on ecological and agronomic parameters, such as (Table 1): (i) gross annual biomass production flux ($pB = NPP = \Delta B + LCM$), (ii) gross

primary production ($GPP = pB + Ra$), (iii) soil carbon increment (ΔSEs).

Three evolution patterns are considered here: (i) free ecosystem growth, (ii) managed ecosystem, and (iii) plantation ecosystem. Three stages in the forest growth are pointed out (Fig. 3): (i) maximum of current annual increment, a, (ii) maximum of mean annual increment, b, and (iii) balanced fluxes, i.e. global stock maximum, c. Relevant parameters for carbon storage are: (i) stocks (B, SE), as a function of time, (ii) annual variations of stocks ($\Delta B, \Delta SE$), as a function of time, and (iii) typical storage time.

For wood products, two stocks have to be considered: long-lived end products (more than one year lifetime) and current stocks. The annual storage capacity is an assessment of the various fluxes, and depends on the development of wood use and structural changes in the wood sector. Relevant parameters are: (i) stocks (P), as a function of time, (ii) annual variations of stocks (ΔP), as a function of time, (iii) overall wood products flux (pP), and (iv) characteristic storage time.

There are two main ways of action on surfaces: land use changes from non-forest to forest area and forest management changes. As far as products are concerned, the main option is intensification of wood material.

4. Wood energy

Wood energy (Fig. 4) has a significant contribution in the world gross energy supply, almost the same as nuclear energy or hydroelectricity. The potential for energy wood looks like the one for carbon storage: a large part of set aside or marginal land could produce up to 3 Gtoe yr⁻¹ by 2050. Valorisation of forest residues and residues from wood transformation may be also significant and easy to mobilise.

5. Combined carbon storage and wood energy

Forests may fulfil various functions: production, preservation, landscape management, environmental services. Combined uses of forests could help increasing plantation rates and global storage potential. Fossil reserves and available land are compared in Table 2 for three categories: proved recoverable, known in place

and ultimate reserves. Using a simple plantation scenario, the influence on total carbon emissions of single storage, and CCSWE is assessed. The bonus factor is defined as the ratio of CCSWE stored and non-emitted carbon to SSt stored carbon. The positive effect of wood energy is obvious: despite the many uncertainties on fossil reserves and available land, wood energy proves to be a good way: (i) to contribute to the preservation of limited fossil reserves, and (ii) to capture and store carbon.

However, the studied scenario could be insufficient if no other action is engaged: 650 Gt C would be emitted by the use of U1 ultimate reserves, of which only a part could be naturally sequestered by oceans.

6. Concluding remarks

Forest ecosystems have significant carbon storage potential, in comparison with annual emissions. Their effects show restrictions (end-of-growth stock in mature forests, long-term stock sustainability), which can be pushed back with the progressive development of CCSWE, becoming then economically feasible in a larger number of situations. Wood energy production at the global scale, enhancing carbon storage potential, appears to be a realistic way to use ultimate fossil reserves, together with rational use and minimisation of carbon emissions. Except in case of ambitious plantation scenario, this solution has to be accompanied by other actions. When considering implementation issues, studies at the local scale are needed to assess the whole mitigation capacity from an operational and concrete point of view.

1. Introduction

Les combustibles fossiles carbonés fournissent l'essentiel de l'approvisionnement énergétique mondial, et continueront, par effet d'inertie, à jouer ce rôle à moyen terme [8]. Plusieurs voies peuvent limiter l'intensification des émissions résultant de gaz à effet de serre : économies d'énergie, recours à des énergies à plus faibles émissions en carbone, notamment les énergies renouvelables, capture et stockage du carbone. Ce dernier est émis de façon diffuse (transports, faibles puissances) ou concentrée (industries, production thermoélectrique). Il peut être capté et stocké par voie biologique diffuse ou, pour des émissions

concentrées, séparé par voie physico-chimique et, par exemple, stocké en sous-sol.

Les surfaces boisées jouent un rôle majeur dans le stockage biologique. Elles recèlent aussi un potentiel énergétique significatif (bois énergie). *Ces deux aspects, parfois considérés comme contradictoires et souvent abordés séparément, sont ici étudiés conjointement.* Dans cette approche, une nomenclature cohérente est proposée (Tableau 1). Les deux usages étudiés sont comparés, dans leurs grands traits, à l'échelle globale. Deux voies d'action apparaissent : modifier les modes de gestion des stocks des forêts existantes, et accroître le potentiel par de nouvelles surfaces boisées.

2. Surfaces boisées à l'échelle globale et interactions avec le cycle du carbone

2.1. Place dans le cycle du carbone

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 ha [12]. Les surfaces boisées forment l'essentiel de la biomasse continentale, un des trois stocks de carbone actifs du système « surface terrestre-atmosphère », avec l'atmosphère et les océans (Fig. 1). Les flux échangés entre océans et atmosphère (90 Gt C an^{-1}) sont du même ordre de grandeur que ceux échangés entre biomasse continentale et atmosphère (120 Gt C an^{-1}). Le flux anthropique net total, comprenant les émissions des combustibles fossiles ($\sim 7 \text{ Gt C an}^{-1}$) et de la déforestation ($\sim 2 \text{ Gt C an}^{-1}$), quoique de plus faible ampleur ($\sim 9 \text{ Gt C an}^{-1}$), n'est pas, quant à lui, directement compensé par un flux inverse.

2.2. Les surfaces boisées : bilans et évolutions

La variation du stock global de carbone (Tableau 1) résulte de plusieurs 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)

Tableau 1

Nomenclature des paramètres du stockage biologique de carbone

Table 1

Nomenclature of the parameters involved in biological carbon storage

Variables	Variable de stock	Flux annuels bruts	Variations annuelles nettes	Commentaires	
Stocks (t, tC)					
1	Surfaces (m ² , ha)	<i>A</i>	–	ΔA	$A(n) = A(n-1) + \Delta A$
2	Densité de biomasse (s. dim.)	<i>b</i>	–	Δb	$2 = 3/1$; $b + \Delta b = (B + \Delta B)/(A + \Delta A)$ si $A = Cte, \Delta b = \Delta B/A$
3	Stock de biomasse	<i>B</i>	<i>pB</i>	ΔB	$3 = 4 + 5$
4	Biomasse non ligneuse	<i>Bnl</i>	<i>pBnl</i>	ΔBnl	<i>Bnl</i> a une durée de vie < 1 an (feuilles, rameaux...)
5	Biomasse ligneuse	<i>Bl</i>	<i>pBl</i>	ΔBl	$5 = 6 + 10$; <i>Bl</i> a une durée de vie > 1 an
6	aérienne	<i>Bla</i>	<i>pBla</i>	ΔBla	$6 = 7 + 8$
7	diamètre < 7 cm	<i>Bla7–</i>	<i>pBla7–</i>	$\Delta Bla7–$	
8	diamètre > 7 cm	<i>Bla7+</i>	<i>pBla7+</i>	$\Delta Bla7+$	$pBla7+ = (\Delta Bla7+) + (L1+) + M$
9	tronc	<i>Bst</i>	<i>pBst</i>	ΔBst	9 inclus dans 8 ; $pBtr = \Delta Btr + M$
10	Souterraine	<i>Bls</i>	<i>pBls</i>	ΔBls	<i>Bs</i> : racines, <i>pBs</i> : production racinaire ΔBs : accroissement racinaire
11	Biomasse récoltable	<i>Bh</i>	<i>pBh</i>	ΔBh	10 = 6 ou 8, selon utilisations
12	Stock de l'écosystème (tC)	<i>SE</i>	–	ΔSE	12 = 13 + 14
13	Stock de C du sol (tC)	<i>SEs</i>	–	ΔSEs	<i>SEs</i> = biomasse morte du sol $\Delta SEs = L + M - D$
14	Stock de C de la biomasse	<i>B</i>	–	ΔB	14 = 3 ; inclut biomasses aérienne et souterraine, distinctes du stock du sol
Capacité de production (t an⁻¹, tC an⁻¹)					
15	Incrément annuel de biomasse	–	–	ΔB	
16	Incr. annuel de biomasse récoltable	–	–	ΔBh	
17	Bois matériau	–	–	$\Delta Bla7+$	
18	Bois énergie	–	–	ΔBla	
Capacité de stockage (t an⁻¹, tC an⁻¹)					
19	Stockage dans tout l'écosystème	–	–	ΔSE	
20	Stockage dans la biomasse	–	–	ΔB	
21	Stockage dans le sol	–	–	ΔSEs	
Variables écologiques (t an⁻¹, tC an⁻¹)					
22	Production primaire brute	–	<i>GPP</i>	–	$GPP = NPP + Ra$
23	Production primaire nette	–	$NPP = pB$	–	$NPP = pBnl + pBl$
24	Production nette de l'écosystème	–	–	<i>NEP</i>	$NEP = GPP - R = NPP - Rh$
25	Respiration	–	<i>R</i>	–	$R = Ra + Rh$
26	respiration autotrophe	–	<i>Ra</i>	–	
27	respiration hétérotrophe	–	<i>Rh</i>	–	Régime permanent : $Rh = LCM$
28	Litière, consommation, mortalité	–	<i>LCM</i>	–	$LCM = L + C + M$
29	Chute de litière	–	<i>L</i>	–	
30	(déchets < 1 an)	–	<i>L1–</i>	–	chute de produits à durée de vie < 1 an (feuilles, rameaux...)
31	(déchets > 1 an)	–	<i>L1+</i>	–	chute de produits à durée de vie > 1 an (branches)
32	Consommation par herbivores	–	<i>C</i>	–	$pBnl = (L1–) + C + \Delta Bnl$; $pBl = (L1+) + M + \Delta Bl$

(continued)

Tableau 1 (continued)

Variabes	Variable de stock	Flux annuels bruts	Variations annuelles nettes	Commentaires
33 Mortalité	–	M	–	(maladies, catastrophes et mortalité naturelle)
34 Décomposition	–	D	–	Consommation par décomposeurs de la biomasse morte : $D = L + M + (1 - e)C - \Delta SEs$
Variabes agronomiques ($m^3, m^3 an^{-1}$)				
35 Stock sur pied				
36 bois matériau	$Bla7+$	–	$\Delta Bla7+$	
37 tronc	Bst	–	ΔBst	
38 bois énergie	Bla	–	ΔBla	
39 Densité ($m^3 ha^{-1}$)	–	–	–	
40 Incrément annuel de bois ($m^3 ha^{-1} an^{-1}$)	–	–	$\Delta Bla7+$	
41 Récolte (exportation de biomasse)	–	xB	–	
42 bois matériau	–	$xBla7+$	–	
43 tronc	–	$xBst$	–	
44 bois énergie	–	$xBla$	–	
45 Stock de produits	P	pP	ΔP	

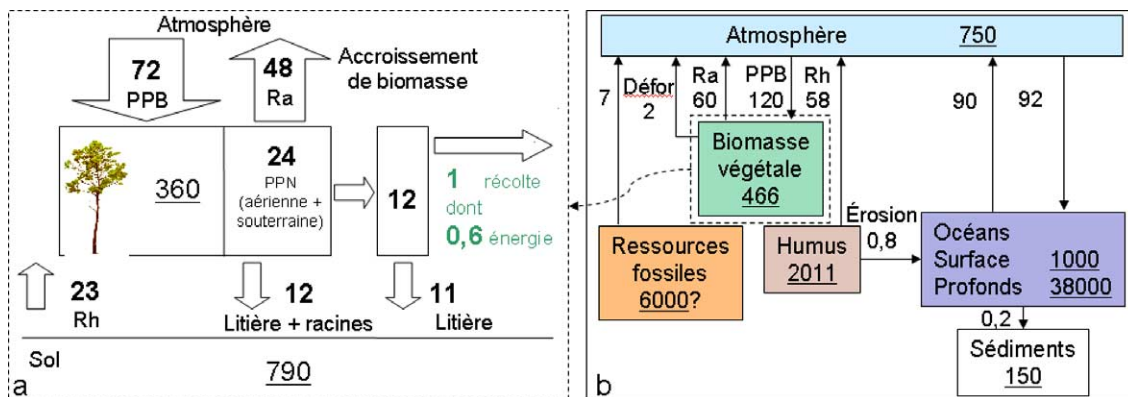


Fig. 1. Stocks (GtC) et flux (GtC an⁻¹) de carbone dans les seules forêts (a) et tous les compartiments du système « surface terre-atmosphère » (b) pour l'année 2000 (adapté de [5,12,16]).

Fig. 1. Carbon stocks (GtC) and fluxes (GtC yr⁻¹) in forests only (a) and all compartments of the 'earth surface-atmosphere' system (b) in 2000 (adapted from [5,12,16]).

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, minéraux...). Actuellement, la surface planétaire de forêts s'élève à 3870 Mha. La situation présente peut sembler paradoxale : les surfaces diminuent et le stock sur pied, lui, paraît augmenter. Cet état n'est évidemment pas pérenne et serait lié au fait que les surfaces actuellement déboisées sont parmi les

moins productives en termes d'accroissement de biomasse, parce qu'elles correspondent souvent à des systèmes proches du climax, c'est-à-dire qui tendent vers un stade d'équilibre.

2.3. Bilan des utilisations des récoltes de bois

N'est considérée ici que la production de bois rond, qui constitue un douzième de l'incrément annuel de biomasse environ. À l'échelle mondiale, plus de la

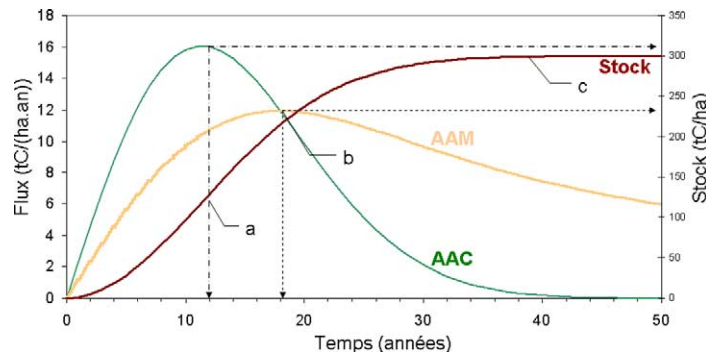


Fig. 3. Stock et flux de carbone dans un écosystème forestier (boisement non géré) : accroissements annuels courant (AAC) et moyen (AAM).

Fig. 3. Stock and fluxes in a forest ecosystem: current (AAC) and mean (AAM) annual increment.

- la production primaire brute ($GPP = pB + Ra$), représentant approximativement la captation première de carbone dans l'atmosphère : les végétaux des écosystèmes jeunes ou exploités ont à la fois une croissance forte et des taux de respiration plus faibles que les systèmes matures ;
- l'accroissement du 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, l'activité de décomposition peut également consommer plus que la production annuelle de déchets, et constituer une source nette vers l'atmosphère.

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

- l'écosystème libre : à partir d'une situation initiale hypothétique (par exemple, prairie naturelle), se développe un peuplement forestier colonisateur, produisant une biomasse importante et modifiant les caractéristiques du sol ; cette communauté évolue vers le stade climax, dont le bilan des flux est nul (la mortalité naturelle compense l'accroissement des arbres vivants) : sa capacité annuelle de stockage apparaît alors nulle ;
- l'écosystème géré ou entretenu, maintenu par l'exploitation dans un état particulier : il favorise une ou plusieurs espèces et a une productivité maximale ; la récolte périodique des produits forestiers, « exportés » de l'écosystème, représente des flux de carbone importants ;

- 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...) ; la production primaire ($pBla$) et l'exportation ($xBla$) sont plus élevées que dans les deux cas précédents, sur des surfaces parfois réduites, mais fortement sollicitées.

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* (Fig. 3) :

- le maximum de l'accroissement annuel courant AAC, au point d'inflexion (a), qui traduit le pic de productivité primaire de l'écosystème ;
- le maximum (b) de l'accroissement annuel moyen AAM, calculé depuis le début de la croissance ;
- l'état d'équilibre des flux, entretenu ou non, correspondant au stock maximal de biomasse sur pied (c), asymptote de la courbe de croissance.

Les *paramètres pertinents*, parmi les variables écologiques et agronomiques, pour définir le stockage de carbone sont : (i) la mesure des stocks (B, SE) en fonction du temps ; (ii) les variations annuelles de stockage ($\Delta B, \Delta SE$) en fonction du temps ; (iii) le temps caractéristique de stockage, correspondant à la capacité annuelle de stockage optimale. Il est compris entre 20 et 100 ans, selon les conditions (sol, essence, mode de gestion).

Tableau 2

Matrices de conversion d'usage des sols : variations des stocks et flux

Table 2

Land use change matrix: changes in stocks and fluxes

	Culture	Prairie permanente	Forêt non exploitée	Forêt exploitée au maximum de l'AAM	Forêt exploitée au maximum de l'AAC	Forêt exploitée au maximum du stock
Variation du stock de C total (sol compris), en tC ha ⁻¹						
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 ⁻¹ an ⁻¹						
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	

3.2. Stockage dans les produits

Dans la filière aval de la forêt, deux types de stocks sont à considérer : (i) les stocks de produits finis de durée de vie supérieure à un an, (ii) les stocks circulants (stocks de matières premières, en-cours de production...) et les produits de durée de vie inférieure à un an.

La capacité annuelle de 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. Le potentiel de stockage 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 (par exemple, en cours de séchage) : bois énergie, papier carton.

Les paramètres pertinents pour le stockage dans les produits du bois sont : (i) la mesure des stocks en fonction du temps (P), (ii) le flux annuel de produits (pP),

le bilan des utilisations et les temps de renouvellement, (iii) la variation annuelle de stockage en fonction du temps (ΔP), et (iv) le temps caractéristique de stockage.

En 2001, le flux annuel mondial (Fig. 2) de bois rond récolté est de 3,4 Gm³ an⁻¹, soit 1,1 Gt C an⁻¹. Les produits de durée de vie supérieure à un an, hors bois énergie, représentent 0,6 Gt C. En moyenne mondiale, la durée de stockage dans les produits est de 27 ans, ce qui tient compte de la contribution de chaque type de produits [14] : construction et ameublement (40 ans), papier, carton, emballage (7 ans). On évalue alors le stock à 32 Gt C.

3.3. Marges d'action et d'évolution

Sur les surfaces, deux champs d'action sont possibles :

- le changement d'usage des sols d'un système non ou faiblement boisé vers un système fortement boisé ;
- le changement de mode de gestion d'un système libre ou non géré vers un système plus fortement contrôlé.

Le Tableau 2 compare, par écosystème, dans une matrice de conversion des sols, les variations des stocks

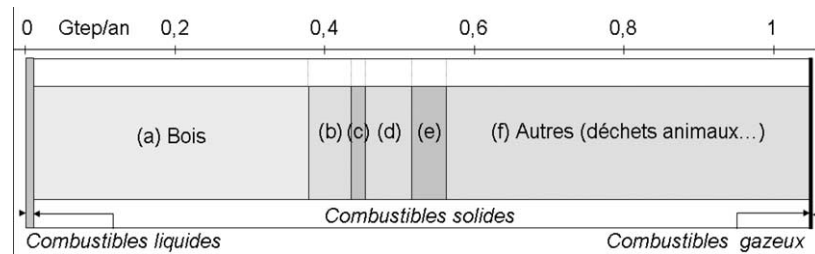


Fig. 4. Utilisation de la biomasse énergie en 2000 : combustibles solides – (a) bois, (b) charbon de bois, (c) résidus de bois, (d) liqueur noire, (e) bagasse et (f) autres (déchets animaux...), liquides et gazeux.

Fig. 4. Use of energy biomass in 2000: solid – (a) wood, (b) charcoal, (c) wood residues, (d) black liquor, (e) bagass and (f) other (animal waste...), liquid and gaseous fuel.

(en régime établi) et flux entre écosystème initial et écosystème final, dans l'ensemble biomasse et sol. Les flux de stockage dans le sol tiennent compte d'une constante de temps de reconstitution du stock [3], d'où une matrice asymétrique. La conversion d'une surface quelconque en forêt non exploitée produit *in fine* le stock le plus important, mais ce stock, obtenu sur un temps long, se constitue à partir d'un flux annuel de stockage faible. Il n'en est pas de même pour une forêt exploitée au maximum de l'accroissement annuel moyen. Dans l'Europe « à 15 pays », 116 Mha sont couverts de forêts, et 142 Mha de terres agricoles. En supposant que toutes les terres agricoles soient converties en forêts, ce qui constitue bien sûr une hypothèse excessive, voire tout à fait extravagante, un stock compris entre 7 et 18 GtC pourrait être constitué, le flux supplémentaire de stockage étant compris entre 0,18 et 0,62 GtC an⁻¹ (soit entre 20 et 66 % des émissions de l'Union européenne).

Sur les *produits*, le champ d'action principal est l'intensification de l'usage du bois matériau. Envisager un entreposage longue durée de produits forestiers ne semble guère réaliste, pour des raisons techniques et économiques, mais aussi du fait du phénomène de décomposition difficile à maîtriser (émissions de méthane...). En Europe, la part du bois récolté utilisé dans la construction est d'environ 10 % ; pour les seuls produits sciés, elle est de 32 % aux États-unis et de 51 % en Nouvelle-Zélande [6]. Un accroissement très significatif à l'échelle mondiale (par exemple, doublement des flux annuels) conduirait à stocker un supplément de 0,4 GtC an⁻¹ sur 40 ans, soit 16 GtC, si la durée de vie moyenne reste inchangée.

4. Rôle du bois énergie

4.1. Typologie des usages du bois énergie

Actuellement, le bois énergie (Fig. 4) apporte une contribution significative au bilan énergétique mondial, proche de celles de l'énergie nucléaire ou hydroélectrique. Cette contribution, d'une comptabilité moins stricte que les énergies conventionnelles, n'apparaît généralement pas dans le bilan des énergies primaires. L'apport en bois énergie dans les pays en développement peut 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 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⁻¹ 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), la majeure partie étant issue du bois ou de ses déchets et des déchets solides municipaux, les biocarburants et le biogaz étant presque négligeables [9].

Une *typologie* du bois énergie doit prendre en compte deux aspects : la forme du combustible et la technologie énergétique. Le bois énergie est utilisé sous diverses formes : (i) bois combustible et ses produits (bûches, plaquettes), ainsi que les résidus de récolte, (ii) déchets de bois (sciures, copeaux)

et leurs produits (granulés, plaquettes), (iii) produits de la conversion thermo-chimique (charbon de bois par pyrolyse ou, de façon plus expérimentale, bio-carburants) et (iv) produits de la gazéification. Les technologies énergétiques diffèrent selon les usages individuels, collectifs ou industriels, et selon la forme d'énergie utilisée (chaleur, électricité). On distingue : (i) les foyers individuels ouverts ou fermés, (ii) les chaudières individuelles, (iii) les chaudières de chaufferies collectives et industrielles, (iv) centrales de production d'électricité et de cogénération.

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⁻¹ en France, et environ 23 Mtep an⁻¹ dans l'Union européenne) à 15 (l'élargissement à 25 pays monte cette consommation à environ 30 Mtep an⁻¹) ;
- le chauffage collectif 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 vient du bois, très majoritairement en cogénération).

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

Contrairement aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), le bois énergie, quand la biomasse est renouvelée en forêt, peut être considéré en première approche comme neutre vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre. Il permet donc, lorsqu'on y a recours de manière adaptée (composés organiques volatiles...) en substitution aux combustibles fossiles, de préserver les ressources non renouvelables d'énergie et d'éviter des émissions de CO₂.

4.2. Marges d'action et d'évolution

Comme pour le stockage de carbone, deux types d'actions *sur les surfaces* peuvent 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⁻¹ à l'horizon 2050 [4]. La valorisation des résidus forestiers, dans le cadre d'exploitations existantes, présente également un potentiel important (0,2 à 0,4 Gtep an⁻¹ [10]). Enfin, dans le champ de *l'utilisation des produits*, la part des déchets de l'industrie du bois non valorisés représente un potentiel apparemment sous-utilisé, le plus aisé à mobiliser à court terme.

5. Usages conjoints

5.1. Typologie des usages multifonctions des forêts

On peut distinguer quatre grandes catégories de fonctions des systèmes forestiers :

- production : bois matériau ou combustible, agro-foresterie ;
- 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 (stockage de carbone, traitement des eaux, remédiation).

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 [15] : (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

Tableau 3

Réserves fossiles et réserves de surface : impact du stockage seul et de l'usage conjoint stockage-bois énergie sur les flux nets de carbone. Hypothèses sur les réserves fossiles d'après [1,2,11,17], et sur les surfaces (d'après [4])

Table 3

Fossil reserves and available land: impact on net carbon fluxes of single storage and combined storage and energy wood. Assumptions on fossil reserves from [1,2,11,17], and on available land (from [4])

		Réserves prouvées P	Réserves additionnelles A	Réserves ultimes			
				U1	U2	U3	
Réserves de combustibles fossiles carbonés							
(a)	Stock (gaz, pétrole et charbon)	Gtep	946	1326	1475	4736	23411
(b)	Stock (équivalent des émissions en C)	Gt C	1035	1320	1503	5092	17347
(c)	Consommation moyenne	Gtep an ⁻¹	13,3	13,8	13,9	14,8	15,3
		Gt C an ⁻¹	10,5	10,9	11,0	11,7	12,1
(d)	Durée d'épuisement des stocks, soit (a)/(c)	années	71	96	106	320	1530
Réserves de surfaces à boiser							
(e)	Surfaces mobilisables	Mha	612	918	2394	2394	2394
(f)	Taux de boisement annuel	Mha an ⁻¹	9	9	18	18	18
(g)	Durée de plantation, soit (e)/(f)	années	68	102	133	133	133
Stockage libre (sans exploitation)							
(h)	Stockage cumulé	Gt C	160	221	451	646	646
		% 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	167	443	443	443
(j)	Emissions évitées cumulées	Gt C	93	165	409	2950	12200
(k)	Emissions résultantes cumulées, soit (b)–(l)	Gt C	942	1155	1094	2141	5147
		% de (b)	9%	13%	27%	58%	70%
Total							
(l)	Cumul total, soit (i) + (j)	Gt C	204	332	852	3393	12643
		% de (b)	20%	25%	57%	67%	73%
Bonification du bois énergie, soit (l)/(h)			1,28	1,51	1,89	5,25	19,57

(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.

5.2. Stratégies et potentialités de stockage

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 [7].

Le Tableau 3 compare les réserves énergétiques fossiles et les réserves de surface pour trois catégories de réserves (prouvées récupérables PR, prouvées en place PP, et ultimes U1, U2 et U3), classées des plus certaines aux plus incertaines. Les catégories de réserves fossiles, en fonction de scénarios de référence [19], 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. On compare le stockage seul, directement lié au scénario retenu, à l'usage conjoint stockage-bois énergie. On ne prend pas en compte les éventuels effets naturels liés à l'accroissement du stock existant. On définit le facteur de bonification du bois énergie en rapportant les flux captés et évités dus au stockage

avec production de bois énergie à ceux du stockage seul.

Pour chaque hypothèse de réserves de combustibles fossiles, le même scénario de consommation [18] 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^{-1} , 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).

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, elle paraît modérée sur les premières années. Ce calcul constitue une évaluation au premier ordre, qu'il conviendrait d'affiner, en tenant compte notamment des émissions de carbone liées à la consommation d'énergie fossile externe [13]. Dans le cas du bois énergie, selon les situations (type de culture, type de combustible), la part des émissions fossiles sur tout le cycle de vie représente typiquement entre 2 et 5 % des émissions évitées, par exemple dans le cas de l'utilisation des plaquettes forestières, ce qui justifie en première approximation de les négliger. Les valeurs extrêmes peuvent être comprises entre 0,5 et 20 % des émissions évitées. 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

[18] (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 (réserves U2 et U3) que l'effet de bonification devient plus significatif. 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. Conclusion

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 d'autres types d'allocations des terres, c'est-à-dire 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.

Remerciements

Les auteurs remercient Vincent Dameron (ingénieur du GREF) pour ses commentaires et suggestions. Ce travail fait l'objet d'un contrat Gaz de France.

Références

- [1] N. Alazard, L. Montadert, Ressources pétrolières pour le XXI^e siècle : quel avenir ?, Rev. IFP 48 (1993) 69–82.
- [2] B. Alpern, M.J. Lemos de Sousa, Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels: definitions, classifications, reserves-resources, and energy potential, *Coal Geol.* 50 (2002) 3–41.
- [3] D. Arrouays, J. Balesdent, J.-C. Germon, P.-A. Jayet, J.-F. Soussana, P. Stengel, Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? Expertise scientifique collective INRA, 2002.
- [4] G. Berndes, M. Hoogwijk, R. van den Broek, The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass Bioenergy* 25 (2003) 1–28.
- [5] J.-F. Bonnet, Les biomasses contrôlées par l'homme à l'échelle mondiale : alimentation de la population, impacts sur l'effet de serre, in : Congrès français de génie des procédés, GP2001, Nancy, 17–19 octobre 2001, Récents progrès en génie des procédés, vol. 15, n°86, Lavoisier Tec&Doc, Paris, 2001, pp. 411–418.
- [6] A.H. Buchanan, S.B. Levine, Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions, *Environ. Sci. Policy* 2 (1999) 427–437.
- [7] M.G.R. Cannell, Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK, *Biomass Bioenergy* 24 (2003) 97–116.
- [8] M. Combarous, A. Prieur, Les consommations d'énergie dans le monde : une méthode robuste de prévision de leur évolution à moyen terme, premières conséquences, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 943–950.
- [9] Eurostat, Renewable energy sources statistics in the EU, Iceland and Norway, 2002.
- [10] M. Hoogwijk, A. Faaij, R. van den Broek, G. Berndes, D. Gielen, W. Turkenburg, Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy, *Biomass Bioenergy* 25 (2003) 119–133.
- [11] G. Plouchart, Évaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, club « Énergie, Prospective et Débats », Penser l'avenir pour agir aujourd'hui, étude n°6, Commissariat général du plan, 2001.
- [12] FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), Évaluation des ressources forestières, Rome, 2004.
- [13] A. Prieur, Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone, thèse, université Bordeaux-1, 2004.
- [14] A. Prieur, M. Combarous, Forêts et cycles de vie : aspects énergétiques, produits, carbone stocké, in : Congrès Forestier Mondial, Québec, Canada, 21–28 septembre 2003.
- [15] J. Richardson, R. Björheden, P. Hakkila, A.T. Lowe, C.T. Smith, *Bioenergy from sustainable forestry, Guiding principles and practice*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [16] M. Robert, B. Saugier, Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 577–595.
- [17] B. Tissot, Quel avenir pour les combustibles fossiles ? Les avancées scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec les énergies carbonées ?, *C. R. Acad. Sci., Ser. IIa* 333 (2001) 787–796.
- [18] B. Tissot, Sources d'énergie primaires et effet de serre, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 597–601.
- [19] T.M.L. Wigley, D.S. Schimel, *The Carbon Cycle*, Cambridge University Press, 2000.