



**HAL**  
open science

# La forêt française, l'agroforesterie et la filière bois : quel potentiel d'atténuation climatique à moyen et long terme ?

Michel de Galbert

## ► To cite this version:

Michel de Galbert. La forêt française, l'agroforesterie et la filière bois : quel potentiel d'atténuation climatique à moyen et long terme ?. 2021. hal-03447485

**HAL Id: hal-03447485**

**<https://hal.science/hal-03447485v1>**

Preprint submitted on 24 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## LA FORÊT FRANÇAISE, L'AGROFORESTERIE ET LA FILIÈRE BOIS : QUEL POTENTIEL D'ATTÉNUATION CLIMATIQUE À MOYEN ET LONG TERME ?

---

MICHEL DE GALBERT

---

### L'EFFET CARBONE DE LA FORÊT : DU PUIT À LA POMPE

La combustion d'énergies fossiles et la production de ciment font du CO<sub>2</sub> le principal gaz à effet de serre (78 % du total mondial des émissions mesurées en « équivalent tonne de CO<sub>2</sub> »). Cependant, grâce à la photosynthèse, ces émissions sont en partie compensées par des flux de CO<sub>2</sub> depuis l'atmosphère vers la terre et les océans. La forêt, mais aussi les prairies, les plantes cultivées, les algues et le plancton capturent en effet du carbone et le stockent dans la biomasse et dans les sols. C'est ce qui représente l'accroissement biologique ou production primaire ; l'homme prélève une partie de cette production pour ses besoins propres. Lorsque l'accroissement excède le prélèvement, l'excédent est stocké tous les ans, et c'est ce stockage annuel additionnel que l'on qualifie de puits de carbone, et que l'on qualifiera de stockage dans la suite du texte. Le stockage du carbone en forêt se produit à la fois dans les parties aériennes, dans les racines, et dans le sol forestier, plus riche en carbone que les sols agricoles.

Cependant, le stockage du carbone a des limites (on ne peut guère stocker plus de 1000 m<sup>3</sup> de bois à l'hectare en France). Dans une forêt longtemps laissée à elle-même, il y a théoriquement autant de biomasse créée que de biomasse qui se décompose en libérant son carbone dans l'atmosphère. On peut comparer la forêt à un réservoir qu'on pourrait remplir de carbone : tant que le réservoir n'est pas plein, le stockage peut opérer. Cela est utile pendant le temps du remplissage, mais quand le réservoir est plein, la fonction de stockage atteint sa limite.

L'intérêt pour l'homme d'utiliser la biosphère en valorisant la biomasse avant qu'elle ne se décompose en relâchant du CO<sub>2</sub> est avant tout de substituer un matériau renouvelable à une énergie fossile ou à un matériau utilisant beaucoup d'énergie fossile pour sa fabrication. Pour optimiser le levier de la substitution, l'homme peut agir triplement :

- équilibrer au mieux la quantité de bois prélevée et l'accroissement biologique ;
- favoriser la production de bois d'œuvre et la fabrication des panneaux, qui permettent une cascade de substitutions, à la base de l'économie circulaire, et également augmenter le stock dans les usages du bois (stockage qui, comme tout stockage, a un effet limité dans le temps) ;

— améliorer les rendements énergétiques des appareils de chauffage, de cuisson et de production, tout en modérant les besoins (isolations des habitations, maisons passives...).

Un avantage de la substitution comparée au stockage forestier est que le stock de carbone forestier peut brûler, être renversé par une tempête, mourir suite à une attaque d'insectes ou après une canicule. Une économie sur une énergie fossile est, elle, acquise définitivement.

C'est pourquoi le levier du stockage peut être utile, mais il doit rester « second » par rapport au levier de la substitution, qui est le seul effet durable et irréversible : par exemple, un stockage excessif en forêt peut gêner la régénération naturelle en forêt, sa bonne gestion, et partant, les substitutions ultérieures possibles.

## **LE CALCUL DU BILAN CARBONE — STOCKAGE ET SUBSTITUTION — DE LA FORÊT**

Le bilan carbone de la forêt (ainsi que de l'agroforesterie et des haies) doit donc se calculer en mesurant à la fois les effets de stockage additionnel, en forêt et hors forêt, et de substitution, dans une vision intersectorielle. Pour en montrer l'importance possible et justifier des politiques publiques à la hauteur des enjeux, il convient de pouvoir en mesurer précisément les effets. Il faut donc s'entendre sur la méthode de calcul, puis mesurer l'évolution possible du bilan carbone dans la durée, en fonction d'hypothèses différenciées de politiques forestières et agroforestières (scénarios au fil de l'eau et dynamique).

### **Le calcul de l'effet de substitution**

Il montre des gains d'émissions de gaz à effet de serre (GES) importants. En effet :

- 1 m<sup>3</sup> de bois énergie en lieu et place d'énergie fossile (gaz ou fuel) permet de réduire nos émissions de CO<sub>2</sub> de 0,94 t de CO<sub>2</sub> pour les feuillus et 0,76 t de CO<sub>2</sub> pour les résineux.
- 1 m<sup>3</sup> de bois d'œuvre feuillu évite immédiatement l'émission de 1,1 t de CO<sub>2</sub> et de 2 t de CO<sub>2</sub> à long terme.
- 1 m<sup>3</sup> de bois d'œuvre résineux évite immédiatement l'émission de 1,1 t de CO<sub>2</sub> et de 1,86 t de CO<sub>2</sub> à long terme.

(Source : ADEME ; Sathre et Gustavsson, 2009, *cf.* calculs en annexe, p. 672).

Ces chiffres montrent aussi l'importance de la bonne hiérarchisation des usages. En effet, si on utilisait 1 m<sup>3</sup> de grume de bois feuillu comme du bois énergie et non comme bois d'œuvre, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par substitution ne serait que de 0,94 au lieu de 1,1 soit une réduction de 0,16 t de CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup>, et de 1,06 t de CO<sub>2</sub> à long terme.

### **Le calcul des effets de « stockage »**

Il faut distinguer le stockage (annuel additionnel) en forêt, le stockage résultant des nouvelles plantations forestières et agroforestières, et le stockage dans les produits bois en aval de la forêt.

- Le stockage en forêt est actuellement de 70 Mt de CO<sub>2</sub> par an en France (Colin, 2014), conséquence notamment de la politique du Fonds forestier national conduite de 1953 à 1990, de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, et de la sous-exploitation des forêts. Son évolution dans le temps se calcule en tenant compte de l'accroissement observé et prévu, diminué du prélèvement supplémentaire envisagé.

- Le stockage dû aux nouvelles plantations et à l'agroforesterie résulte de l'augmentation de la nouvelle biomasse ainsi produite, non prélevée.
- Le stockage dans les produits bois en aval de la forêt. À long terme, les bénéfices de ce stockage disparaîtront lorsqu'on n'augmentera plus l'usage du bois tous les ans.

### Le calcul global du bilan carbone

Nous connaissons la récolte annuelle des forestiers sur l'ensemble de la forêt française (en bois énergie, papier, panneaux et bois d'œuvre) et son évolution dans le temps. Il est donc possible de quantifier pour les deux scénarios son bilan carbone direct (stockage ou déstockage dans la biomasse en forêt, et dans les usages du bois) mais aussi indirect (substitution) et au total, les émissions nettes globales de CO<sub>2</sub> évitées.

### LE BILAN CARBONE DE LA FORÊT FRANÇAISE : QUELLE ÉVOLUTION DE 1908 À 2009 ?

Pendant tout le XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs facteurs (guerres, industrialisation et urbanisation, évolution des transports et mondialisation, mécanisation de l'agriculture...) se sont conjugués pour entraîner un important exode rural et un recul de l'agriculture dans les zones les moins productives. Ceci a conduit à la reforestation de plus de 6 millions d'hectares. De plus, pendant la deuxième partie du XX<sup>e</sup> siècle, une politique forestière dynamique a constitué des peuplements résineux de haut intérêt économique pour notre pays, en déficit de bois résineux. Même si ces peuplements ont parfois été disposés de façon peu rationnelle (en timbres-poste), ils ont revitalisé des régions entières et généré un grand nombre d'emplois en moyenne montagne, dans des régions souvent désertifiées.

Les conséquences à l'échelle du siècle (1908-2009) ont consisté en un quasi-triplement des prélèvements annuels de bois, qui sont passés de 24 à 62 millions de mètres cubes (CITEPA, 2014), le stockage annuel supplémentaire de carbone par la forêt passant de 39 Mt de CO<sub>2</sub> par an à 70 Mt de CO<sub>2</sub>.

Ainsi, sans la contribution de la forêt et de la filière bois, les émissions en France s'élèveraient aujourd'hui à 584 Mt de CO<sub>2</sub> au lieu de 451 Mt de CO<sub>2</sub>. Elles seraient donc supérieures de 30 % !

Cependant, la tendance depuis une vingtaine d'années est nettement moins favorable. En effet :

- La récolte stagne à 43 millions de mètres cubes tiges, soit moins de la moitié de l'accroissement de 92 millions de mètres cubes (Colin, 2014) ; il reste donc un gisement brut annuel maximum de 41 millions de mètres cubes tiges (déduction faite de la mortalité), gisement localisé à 57 % en petite et moyenne forêt privée, à 25 % en grande forêt privée et à 18 % en forêt communale.
- Nous importons 2,8 millions de mètres cubes de sciages résineux, ce qui représente un besoin de production brute de + 5 millions de mètres cubes de bois résineux, alors que notre possibilité de récolte supplémentaire annuelle en forêt est de 11 millions de mètres cubes (Colin, 2014). Les prélèvements dus aux dépérissements d'origine climatique laissent entrevoir par ailleurs des besoins de renouvellement des essences.
- Nous avons peu de stockage additionnel dans les produits puisque l'activité des filières aval est stable (5,4 millions de mètres cubes) (CITEPA, 2014).

TABLEAU I **L'atténuation par la forêt et l'usage du bois en 2012**

	Références	Consommation	Dont vie courte	Dont vie longue	Stockage- Puits	Substitution	Atténuation totale
		en millions de m <sup>3</sup>			en millions de tonnes de CO <sub>2</sub>		
Références	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Puits en forêt hors plantations	B1				70	0	70
Bois bûches forêt et bocage	B2	32,0	32,0			24,0	24,0
Bois énergie, plaquettes	B3	1,2	1,2			1,1	1,1
Rondins, trituration	B5	12,0	8,0	4,0		11,4	11,4
Grumes bois d'œuvre feuillus	B6	5,2	2,6	2,6		5,3	5,3
Grumes bois d'œuvre résineux	B7	15,9	8,0	8,0		14,8	14,8
Plantations							
Agroforesterie	B8						
Stockage supplémentaire dans les usages					5,4		5,4
<b>Total</b>		<b>66,3</b>	<b>51,7</b>	<b>14,5</b>	<b>75,4</b>	<b>57</b>	<b>132</b>

\* Dont bois énergie 31 Mt de CO<sub>2</sub>, soit 55 % de la substitution totale. On a classé par simplification les plaquettes issues de connexes de scierie servant à la fabrication de panneaux en produits à vie courte. De même, la substitution directe de l'usage actuel des produits bois en fin de vie n'est pas prise en compte (reportée dans le tableau III, p. 669).

Sources : Agreste-Graph agri, 2013 (A2) ; Colin, 2014 (B1) ; CITEPA (2014) ; ADEME (2013).

## **QUELS SCÉNARIOS ET QUELS BILANS CARBONE POUR LA FRANCE AUX HORIZONS 2030 ET À LONG TERME ?**

### **Un avenir subi : le scénario au fil de l'eau**

Si l'on reste au statu quo actuel, qui dure depuis 25 ans, le stockage en forêt, qui devrait passer par un pic à 84 Mt de CO<sub>2</sub>/an (Colin, 2014), pourrait redescendre au niveau actuel en 2050 (Loustau, 2004). Par ailleurs, les forêts du sud de la France risquent d'être fortement dégradées par les effets

du réchauffement, ce qui aboutirait à une reprise des incendies et à une plus grande vulnérabilité aux tempêtes et aux attaques d'insectes ravageurs.

Au total, l'atténuation totale forêt-bois passerait de 132 Mt de CO<sub>2</sub> actuellement, à 148 Mt de CO<sub>2</sub> en 2030, pour retomber à 57 Mt de CO<sub>2</sub> à long terme (tous les effets de stockage s'annulant), ce qui représenterait une régression de - 75 Mt de CO<sub>2</sub> par rapport à la situation actuelle.

### Un avenir choisi : le scénario dynamique, ambitieux et réaliste

Faire le choix d'un scénario ambitieux et réaliste pour optimiser l'utilisation de la biomasse ligneuse suppose de travailler en même temps sur trois axes complémentaires :

- une politique de mobilisation du gisement,
- une politique de plantations agroforestières et forestières,
- une politique de dynamisation en aval (dynamisation de la demande en bois, dynamisation des industries de transformation).

Faire le choix d'un tel scénario suppose de se fixer des objectifs qui soient à la fois ambitieux et réalistes. Ceci nous conduit à proposer les objectifs suivants :

#### • Mobilisation du gisement

Tout le gisement français ne pourra pas être mobilisé, certains territoires étant très difficiles d'exploitation, et l'effort de regroupement de la petite et moyenne forêt privée prendra du temps. Une politique ambitieuse mais réaliste correspond au scénario dynamique de l'étude IGN en 2030 (60 % de l'accroissement feuillu et 90 % de l'accroissement résineux) [soit 50 millions de mètres cubes feuillus (branches comprises) + 11 millions de mètres cubes de bois issus du bocage + 37 millions de mètres cubes de bois résineux] puis 90 % de l'accroissement toutes essences en 2050. Rappelons qu'actuellement seulement 46 % de la forêt française bénéficient de plans de gestion durable et aménagements et que moins de la moitié de l'accroissement est mobilisé.

#### • Plantations forestières

Des plantations complémentaires bien intégrées au paysage à raison de 30 000 ha par an en forêt et en zones de friches (dont il existe 2,1 millions en France) complèteraient les peuplements forestiers productifs de haute valeur indispensables à l'économie du bois, tout en adaptant les forêts au choc du changement climatique.

#### • Plantations agroforestières hors forêt

L'agroforesterie incluant le bocage mais aussi des alignements d'arbres en plein champ peuvent contribuer à la fois au mouvement actuel de l'agroécologie tout en fournissant du matériau bois et une biomasse importante. Cette création de haies et d'alignements, à raison de 50 à 80 arbres par hectare restituerait de façon plus rationnelle les avantages du bocage et des pratiques passées d'arbres disséminés (pommiers à cidre) : séquestration, production de biomasse, matière organique, lutte intégrée, ombrage, lutte contre l'érosion, cycle de l'eau, pollinisation. On propose à l'horizon 2050 une hypothèse d'assiette de 4 millions d'hectares (2,5 millions d'hectares en 2030) avec plantations d'arbres en plein champ comprenant la reconstitution de haies sur 0,7 million de kilomètres (1,4 million de haies ayant été supprimées depuis 1960<sup>(1)</sup>) soit 11 % de la SAU, ce qui est dans l'ordre de grandeur des propositions de l'ADEME (15 % de la SAU).

(1) Il restait en France 605 000 ha de haies et 333 000 ha d'arbres épars, soit au total 3,1 % de la SAU (Pointereau, 2002).

## LES BÉNÉFICES À ATTENDRE DU SCÉNARIO DYNAMIQUE

La mise en œuvre du scénario dynamique aurait des effets majeurs pour nos émissions de gaz à effet de serre et en termes d'emplois. Les tableaux de calcul ci-dessous et en annexe montrent en effet les bénéfices suivants.

À l'horizon 2030, le bénéfice carbone annuel dû à l'action de l'homme, se décomposerait en :

- 62 Mt de CO<sub>2</sub> de substitution directe par le développement du bois-énergie (et des carburants de deuxième génération) ;
- 32 Mt de CO<sub>2</sub> de substitution indirecte de l'usage du bois d'œuvre à la place de matériaux énergivores ;
- 69 Mt de CO<sub>2</sub> par stockage de carbone en forêt et dans les usages du bois.

TABLEAU II **Simulation à l'horizon 2030 (scénario dynamique IGN, bocage compris)**

	Références	Consommation	Dont vie courte	Dont vie longue	Stockage- Puits	Substitution	Atténuation totale
		en millions de m <sup>3</sup>			en millions de tonnes de CO <sub>2</sub>		
Références	A1	A3	A31	A4	A6	A8	A9
Puits en forêt hors plantations	B1				50	0	50
Bois bûches forêt et bocage		32	32			24	24
Bois énergie plaquettes	B2	11	11			9,7	10
Mobilisation Trituration	B21	26	13	13		25,7	26
Mobilisation bois d'œuvre feuillus	B3	8	4	4		8,2	8
Mobilisation bois d'œuvre résineux	B31	23	11,5	11,5		21,4	21
Plantations 445 000 ha	B4		0	0	3	0,0	3
Agroforesterie 2,5 millions d'hectares	B5	5	5		9	4,7	14
Stockage supplémentaire dans les usages					7,1		7
<b>Total</b>	<b>B1 à B5</b>	<b>105</b>	<b>77</b>	<b>29</b>	<b>69</b>	<b>94</b>	<b>161</b>
Progrès par rapport à 2012							31

Total A3 : cf. calculs en fin d'annexe.

(Le stockage annuel en forêt serait réduit à 62 Mt de CO<sub>2</sub>, plantations comprises mais resterait toutefois positif).

Le bénéfice net en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> serait de + 31 Mt de CO<sub>2</sub> supplémentaires annuels par rapport à 2012.

Par ailleurs, les récents objectifs fixés par le ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie incluent un objectif de 32 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique français à l'horizon 2030, soit, les tonnes équivalents pétrole étant transformées en tonnes de CO<sub>2</sub>, un effort de 82 Mt de CO<sub>2</sub>. La contribution potentielle directe et indirecte de la biomasse et du bois d'œuvre

TABLEAU III **Simulation à long terme  
(90 % mobilisation accroissement 2030, bocage inclus),  
effets de stockage annulés**

	Références	Consommation	Dont vie courte	dont vie longue	Stockage- Puits	Substitution	Atténuation totale
		en millions de m <sup>3</sup>			en millions de tonnes de CO <sub>2</sub>		
Références	A1	A3	A31	A4	A6	A8	A9
Puits en forêt hors plantations	B1				0	0	0
Bois bûches forêt et bocage		32	32			24	24
Bois énergie plaquettes	B2	18	18			15,8	16
Mobilisation Trituration	B21	27	13,5	13,5		37,9	38
Mobilisation bois d'œuvre feuillus	B3	10	5	5		14,7	15
Mobilisation bois d'œuvre résineux	B31	26	13	13		34,1	34
Plantations 1 000 000 ha	B4	17	10	7	0	20,6	21
Agroforesterie 4 millions d'hectares	B5	24	12	12	0	35,3	35
Stockage supplémentaire dans les usages					0		0
<b>Total long terme, scénario dynamique</b>	B1 à B5	<b>154</b>	<b>104</b>	<b>51</b>	<b>0</b>	<b>182</b>	<b>182</b>
<b>Scénario "Fil de l'eau" long terme</b>		<b>66</b>	<b>52</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>57</b>	<b>57</b>

Total A3 long terme : cf. calculs en fin d'annexe.



par la forêt et l'agroforesterie peut représenter 31 Mt de CO<sub>2</sub>, soit 36 % de cet effort, et l'ensemble de la biomasse représenterait alors 62 Mt de CO<sub>2</sub> sur 424 Mt de CO<sub>2</sub> soit 14 % du mix énergétique français, contre 6 % actuellement (31/520 Mt de CO<sub>2</sub>).

Le tableau II (p. 668) donne une lecture synthétique prospective en 2030 du scénario dynamique.

Le tableau III (p. 669) donne une vision, à long terme, en situation permanente, de l'atténuation par la forêt et le bois, quand les effets de stockage s'annulent, et que tous les effets de substitution sont pris en compte.

Discussion sur les tableaux :

Techniquement parlant, on constate qu'à moyen terme l'exploitation supplémentaire de la forêt, en diminuant le stockage annuel supplémentaire (mais sans pour autant réduire le stock total de la forêt), n'a pas d'effet « dépresseur » sur les émissions, bien au contraire, en raison en particulier des taux de substitution du bois d'œuvre supérieurs au contenu carbone du bois sur pied.

Globalement, le gain résultant d'un total d'atténuation de 163 Mt de CO<sub>2</sub> en 2030 et de 182 Mt de CO<sub>2</sub> à long terme paraît modeste par rapport à 2012 (132 Mt de CO<sub>2</sub>), du fait d'une diminution du puits forestier. Il faut en fait considérer les progrès de la substitution, seul levier durable, qui doublerait en 2030, et pourrait tripler à long terme.

Dans cette perspective, toutes choses restant égales par ailleurs, le puits forestier et dans les usages s'annulerait, et le scénario au fil de l'eau prolongé aboutirait à une atténuation totale réduite à la seule substitution (en employant les coefficients de substitution à long terme) de 57 Mt de CO<sub>2</sub>, dans une situation d'atténuation dégradée de - 75 Mt de CO<sub>2</sub> par rapport à la situation actuelle, tandis que le scénario dynamique aboutirait à une atténuation réduite à la seule substitution de 182 Mt de CO<sub>2</sub>, dans une situation améliorée de 50 Mt de CO<sub>2</sub> par rapport à la situation présente, mais de + 125 Mt de CO<sub>2</sub> par rapport au scénario au fil de l'eau !

## **LES MESURES DE POLITIQUES PUBLIQUES POUR PASSER DU SCÉNARIO AU FIL DE L'EAU AU SCÉNARIO DYNAMIQUE**

Le passage au scénario dynamique justifierait un volet forestier au plan national d'atténuation du réchauffement climatique dont le contenu reste à préciser, alliant mesures publiques et d'initiative privée.

Les principaux axes pourraient être les suivants :

- Organisation de la mobilisation complémentaire des bois issus des forêts communales et de la grande forêt privée.
- Organisation de la mobilisation du gisement par la mise en place de plans forestiers de territoires dans les zones forestières qui le justifient. Ces plans forestiers inciteraient fortement les propriétaires de petites et moyennes forêts privées à se regrouper en GIEEF (groupements créés par la loi d'avenir) dans un délai donné, l'échelle communale et intercommunale pouvant être privilégiée. Cette obligation de mise en gestion durable des forêts à double potentiel socioéconomique et environnemental serait assortie d'avantages fiscaux et d'incitations *ad hoc*.
- Mise en place avec les régions de mesures volontaristes d'appui au développement de l'agroforesterie et à la plantation de haies dans le cadre de la politique de développement agricole.

- Relance d'une politique de reboisement à travers le fonds stratégique de la forêt et du bois à alimenter par des fonds-carbone. Cette action doit être conduite avec prudence. Les projets les plus importants doivent être précédés d'une étude paysagère et pédologique, et les mélanges d'essence doivent être préconisés autant que possible, en tenant compte des besoins d'adaptation de la forêt française au nouveau contexte climatique.

- Adoption de mesures donnant un avantage concurrentiel à l'utilisation du bois dans la construction (du bois feuillu en particulier) notamment par la commande publique, actions de marketing et d'innovation design (en cours de chiffrage), développement des industries du panneau dont le facteur d'atténuation est important.

- Aménagement du marché du carbone, par la fixation d'un minimum au prix de la tonne de carbone, permettant de financer durablement les équipements de substitution aux énergies fossiles et de favoriser les secteurs les plus utiles à l'atténuation climatique.

- Création d'un observatoire national forêt-climat pour suivre la mise en œuvre du plan national et proposer les ajustements nécessaires.

Le risque de se satisfaire de la situation actuelle, où l'on peut être tenté de considérer le puits de carbone comme une donnée acquise pour toujours, est de se retrouver dans une situation sérieusement dégradée. Tout puits de carbone trop important doit au contraire fonctionner comme un signal d'alerte pour relancer l'usage du bois et la substitution qu'il entraîne, impliquant toujours davantage la forêt et sa filière dans l'économie verte de demain.

Ce n'est pas le sujet de cette étude, mais la substitution supplémentaire étant directement corrélée à la création d'emplois, on trouve ici encore une raison d'associer étroitement les aspects environnementaux et sociaux dans la conception des stratégies forêt-bois.

**Michel de GALBERT**

Ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts  
CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ALIMENTATION,  
DE L'AGRICULTURE ET DES ESPACES RURAUX  
251 rue de Vaugirard  
F-75732 PARIS CEDEX 15  
(michel.de-galbert@agriculture.gouv.fr)

**ANNEXE****NOTICE DE LECTURE DES TABLEAUX****BIOMASSE FORESTIÈRE AÉRIENNE****Tableau II colonne A6**

Feuillus : facteur d'expansion de 1,61 pour les branches et 1,46 pour les racines, soit 2,06 au total par rapport au volume IFN (Loustau, 2004).

Résineux : facteur d'expansion de 1,33 pour les branches et de 1,40 pour les racines, soit 1,73 au total par rapport au volume IFN (Loustau, 2004).

**Conversion des volumes en masse de carbone**

Contenu carbone du bois	Masse de matière sèche par m <sup>3</sup> de bois, en tonne	Masse de carbone par tonne de matière sèche, en tonne	Masse de carbone par m <sup>3</sup> de bois, en tonne	Masse de CO <sub>2</sub> par m <sup>3</sup> de bois, en tonne
Feuillus	0,54	0,475	0,26	0,94
Résineux	0,438	0,475	0,21	0,76
Moyenne pour calcul du puits				0,86

Source : Loustau (2004).

**AGROFORESTERIE**

Le bénéfice de stockage de l'agroforesterie sur un mix 80 % prairies-20 % cultures annuelles sur un hectare en 40 ans serait de 41 t C, soit 150 t de CO<sub>2</sub>, soit 3,7 t de CO<sub>2</sub>/ha/an. On adoptera *in fine* la valeur de 3,7 t de CO<sub>2</sub>/ha de stockage-réduction des émissions donnée par l'INRA (Chenu *et al.*, 2014), qui tient compte de nombreux effets comme la réduction des engrais, la substitution par l'usage du bois produit n'étant pas comptée.

Autre référence : pour l'agroforesterie, les rendements seraient de 2 tonnes de matière sèche par ha et par an pour le stockage-croissance en agroforesterie (Association française d'agroforesterie - AFAF), soit  $0,475 \times 3,66 \times 2 = 3,47$  t de CO<sub>2</sub>/ha/an.

**Tableaux II et III, croisement A6 x B5**

Un hectare de résineux non éclairci à 15 ans compterait 75 m<sup>3</sup> de tiges et  $75 \times 1,73 = 129$  m<sup>3</sup> de biomasse totale, soit 26 t de carbone, en supplément dans le cas d'une implantation sur une friche, soit 1,7 t de carbone/an, soit 6,3 t de CO<sub>2</sub>/an, pendant 15 ans. Un peuplement, mélange de Pin maritime et de Douglas, de 35 ans d'un hectare compterait (après éclaircies à 14 m<sup>3</sup>/ha/an) 300 m<sup>3</sup> sur pied, soit 420 m<sup>3</sup> de biomasse totale, soit 93 t de carbone, soit 2,6 t de carbone par an, soit 9,7 t de CO<sub>2</sub> par an pendant 35 ans.

## RENDEMENTS FORESTIERS ET AGROFORESTIERS

### Lignes B4

Rendements mélange de Pin maritime (ou Pin laricio)-Douglas (Decourt, 1984) :

14 m<sup>3</sup>/ha/an dont 50 % de bois d'œuvre et 50 % de petits bois plus 20 % de branches exploitables, soit 7 m<sup>3</sup>/ha/an de bois d'œuvre et 9,8 m<sup>3</sup>/ha/an de petits bois.

### Lignes B5

Pour les rendements agroforestiers, on a pris un mélange de 30 % de peupliers et 70 % de feuillus locaux. Le rendement moyen du Peuplier est de 12,7 m<sup>3</sup>/ha/an en France<sup>(2)</sup> (dont 7,9 m<sup>3</sup>/ha/an en bois d'œuvre et 4,8 m<sup>3</sup>/ha/an en petits bois).

Rendements moyens de feuillus en France :

54,8 millions de m<sup>3</sup> tiges IFN/an + 60 % de branches divisés par 10 millions d'hectares, soit 8,7 m<sup>3</sup>/ha/an dont 5 m<sup>3</sup> de tige, dont 70 % (estimation pour l'agroforesterie) de bois d'œuvre, soit 3,5 m<sup>3</sup>/ha plein de bois d'œuvre + 1,5 m<sup>3</sup> de petits bois/ha plein, et 3,7 m<sup>3</sup> de branches, soit 5,2 m<sup>3</sup>/ha de petits bois au total.

En prenant un facteur de 60 % entre un hectare agroforestier et un hectare forestier en plein (Dupraz, 2013), on trouve un rendement moyen pour le mélange précité : 2,1 m<sup>3</sup>/ha de bois d'œuvre agroforestier et 3,1 m<sup>3</sup>/ha/an de petits bois (toutes les branches sont exploitées), soit 5,2 m<sup>3</sup>/ha/an aérien, dont une estimation de 2 m<sup>3</sup>/ha/an de petits bois en 2030.

Pour un mélange d'un tiers de peupliers et de deux tiers de feuillus, on obtient 3 m<sup>3</sup>/ha/an de bois d'œuvre sur un hectare agroforestier pour le bois d'œuvre, et 3 m<sup>3</sup>/ha/an de petits bois sur un hectare agroforestier.

## SUBSTITUTION POUR LE BOIS ÉNERGIE

### Tableaux II et III, croisement A8 x B2

L'analyse des cycles de vie (ADEME, 2005) montre des émissions de 24 kg CO<sub>2</sub>/MWh utile pour les plaquettes forestières, 8 pour les connexes de scierie, 242 pour le gaz naturel, 490 pour le fuel, 105 pour l'électricité, soit une valeur moyenne de 366 pour un mélange fuel-gaz, les deux énergies étant équivalentes actuellement pour le chauffage, et 16 kg CO<sub>2</sub> pour une valeur moyenne plaquettes forestières et connexes de scierie, soit une économie moyenne de 350 kg CO<sub>2</sub> par MWh, sachant qu'une tonne de matière sèche contient 5 MWh, 1,650 t CO<sub>2</sub> par tonne de matière sèche, soit 0,94 t CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> feuillu, et 0,76 t CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> résineux, soit 0,88 t CO<sub>2</sub> pour un mélange comprenant deux tiers de feuillus. Ce coefficient de substitution ne reprend pas celui de l'ADEME, qui propose une substitution moyenne sur le bouquet énergétique moyen du parc de chauffage actuel ; ce raisonnement n'est pas acceptable, car on va chercher à substituer aux énergies les plus polluantes. Bien que les coefficients de substitution et de contenu de t CO<sub>2</sub> dans le bois matière aient la même valeur, il s'agit d'une pure coïncidence. Le coefficient de substitution varie d'un pays à l'autre, fonction de chaque mix énergétique et des comportements des usagers.

(2) 1,9 million de m<sup>3</sup> pour 240000 ha, soit 7,9 m<sup>3</sup> grume/ha/an plus 61 % de branches, soit 4,8 m<sup>3</sup> de petits bois (El Haouzali, 2009).

## SUBSTITUTION POUR LE BOIS D'ŒUVRE ET LE PANNEAU

### Tableaux II et III croisements A8 x B21 à B5

Dans une méta-analyse des facteurs de substitution dans le monde, Sathre et Gustavsson (2009) trouvent une valeur moyenne de 2 tonnes de carbone substituées pour toute tonne de carbone bois mise en œuvre. Ravier (2012) a extrait de cette méta-analyse les valeurs de substitution pures, soit 1,1 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, valeur que nous adopterons ici. Pour le bois d'œuvre, nous appliquerons cette donnée à la moitié du volume du bois d'œuvre (sciages), et pour les panneaux à la totalité de leur volume.

	Coefficient de stockage dans les usages	Substitution directe et indirecte à court terme	Substitution directe et indirecte à long terme
	En tonnes de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>		
Bois énergie bûches		0,75	0,75
Bois énergie feuillu (plaquettes et connexes)		0,94	0,94
Bois énergie résineux		0,76	0,76
Moyenne bois énergie France		0,88	0,88
Bois d'œuvre feuillu (produit mis en œuvre)	0,94	1,1	2
Bois d'œuvre résineux (produit mis en œuvre)	0,76	1,1	1,86
Panneau feuillu (produit mis en œuvre)	0,94	1,1	2
Panneau résineux (produit mis en œuvre)	0,76	1,1	1,86

NB : Pour le bois d'œuvre et les panneaux, la substitution en fin de vie est intégrée pour le calcul du coefficient de substitution à long terme.

## CALCULS DES GISEMENTS TOTAUX EN 2030 ET À LONG TERME

Ils sont issus des travaux de l'IGN (Colin, 2014).

Pour 2030, le taux de prélèvement sur les résineux atteindrait 93 % pour les résineux, soit 31,2 millions de m<sup>3</sup> (Colin, 2014, p. 34), et 37,4 millions de m<sup>3</sup> branches comprises (facteur 1,2 en laissant un tiers des branches au sol), et 58 % chez les feuillus soit 35,8 millions de m<sup>3</sup> en bois fort tige et 50 millions de m<sup>3</sup> branches comprises (facteur 1,2, en laissant un tiers des branches au sol) + 11 millions de m<sup>3</sup> de bois bûches issues du bocage, soit au total 98,4 millions de m<sup>3</sup> + 2 millions de m<sup>3</sup> peupliers, soit 100 millions de m<sup>3</sup>, à quoi il faut ajouter les volumes issus des premières productions de l'agroforesterie, 5 millions de m<sup>3</sup>, soit 105 millions de m<sup>3</sup> au total.

Pour le calcul de la disponibilité à long terme, on a considéré 90 % de l'accroissement estimé pour 2030 (p. 29 de l'étude précitée) de toutes les essences soit 61,2 millions de m<sup>3</sup> bois fort tige, et 85,6 avec branches pour les feuillus, et 34,5 millions de m<sup>3</sup> de résineux, bois fort tige, et 41,4 millions de m<sup>3</sup> avec branches ; avec 11 millions de m<sup>3</sup> de bocage, on arrive à 113 millions de m<sup>3</sup> totaux, peupliers inclus, à quoi il faut ajouter les volumes issus des surfaces agroforestières et des nouvelles plantations, soit au total 154 millions de mètres cubes.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. — Bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel du bois. — 2005 (étude réalisée par BIO Intelligence Service).
- ADEME. — Étude sur le chauffage domestique au bois : marchés et approvisionnement. Étude réalisée pour BVA, SOLAGRO, Biomasse Normandie, ADEME / J.-C. Pouet et A. Gauthier, coordination technique. — ADEME, juin 2013. — 87 p.
- AGRESTE. — GraphAgri Bois – édition 2013. — Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. [En ligne] : disponible sur <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/publications/graphagri/article/graph-agri-bois>
- CHENU (C.), KLUMPP (K.), BISPO (A.), ANGERS (D.), COLNENNE (C.), METAY (A.). — Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *In* : colloque « Atténuations des gaz à effet de serre par l'agriculture », Versailles, 4 juin 2014. — *Innovations agronomiques*, vol. 37, 2014, pp. 23-37.
- COLIN (A.). — Émissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier et au développement de la biomasse énergie en France aux horizons 2020 et 2030. Rapport final. — IGN, 2014. — 58 p. [En ligne] : disponible sur [http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/1\\_projections\\_GES2030\\_foret\\_IGN\\_resultats\\_biomasse\\_2014.pdf](http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/1_projections_GES2030_foret_IGN_resultats_biomasse_2014.pdf)
- DECOURT (N.). — Le Douglas dans le Nord-Est du Massif central : tables de production provisoires. *In* : Tables de production pour les forêts françaises. 2<sup>e</sup> édition. — Nancy : ENGREF, 1984. — 160 p.
- DUPRAZ (C.). — Agroforesterie, des arbres et des cultures. — Éditions France Agricole, 2013. — 400 p.
- EL HAOUAZALI (H.). — Déroulage du Peuplier : effets cultivars et stations sur la qualité des produits dérivés. — Arts et Métiers ParisTech-Centre de Cluny, 2009 (Thèse).
- LOUSTAU (D.), coordinateur. — Rapport final du projet CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. — INRA, 2004. — 138 p.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE ; CAISSE DES DÉPÔTS ; CITEPA. — Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto. — Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique, mars 2014.
- POINTEREAU (Ph.). — Les haies, évolution du linéaire en France depuis 40 ans. — *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n° 46, juin 2002.
- RAVIER (C.). — Étude sur la substitution-matière du bois. — FCBA, 2012 (Rapport de stage ingénieur).
- SATHRE (R.), GUSTAVSSON (L.). — A state-of-the-art review of energy and climate effects of wood product substitution. — Wäxjö University – School of Technology, 2009.

**LA FORÊT FRANÇAISE, L'AGROFORESTERIE ET LA FILIÈRE BOIS : QUEL POTENTIEL D'ATTÉNUATION CLIMATIQUE À MOYEN ET LONG TERME ? (Résumé)**

La gestion dynamique des forêts et de la filière bois, le boisement et l'évolution de la demande en bois sont considérés par le GIEC (2014) comme des outils fondamentaux pour l'atténuation du changement climatique. Mais quelles sont et quelles pourraient être leurs contributions à l'atténuation des gaz à effet de serre (GES) à l'échelle du territoire français ? La présente note explique comment mesurer cette contribution. Elle la chiffre actuellement (2012) et en prospective aux horizons 2030 et à long terme, selon deux scénarios (au fil de l'eau, scénario dynamique). Le passage au scénario dynamique, qui se veut à la fois ambitieux et réaliste, permettrait une réduction supplémentaire d'émissions de GES (par rapport aux émissions actuelles) de 50 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à long terme, soit une augmentation de 38 % de l'effet d'atténuation des forêts et de la filière bois, et un triplement de l'effet de substitution, seul effet climatique durable à long terme.

**FRENCH FORESTS, AGROFORESTRY AND THE FOREST AND FOREST-BASED INDUSTRIES – WHAT IS THE MEDIUM AND LONG TERM POTENTIAL FOR CLIMATE MITIGATION? (Abstract)**

The IPCC (2014) sees dynamic management of forests and of the forest-based industries along with afforestation and changes in the demand for wood as fundamental tools for climate change mitigation. What are and what could be the contribution of these methods and factors to mitigating greenhouse gas (GHG) emissions on the scale of France? This note describes how this contribution can be measured. It provides current (2012) figures and offers forecasts to the 2030 horizon and in the long term, according to two scenarios: the "business as usual" and the dynamic scenario. Switching to the dynamic scenario that aims at being both ambitious and realistic, would make for an additional 50 million-tonne reduction in CO<sub>2</sub> emissions (compared to current levels) yearly in the long term, i.e., a 38% increase in the mitigating effect of forests and of forest-based industries and a tripling of the substitution effect, the only durable long term effect on climate.