



LES LEVIERS FORESTIERS POUR LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Résumé du rapport de l'étude réalisée par l'INRA pour le compte du MAAF – juin 2016

Etude commanditée par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) et financée par le MAAF dans le cadre du programme 215. Le présent rapport n'engage que ses auteurs et ne saurait être considéré comme la position du MAAF.

En vue de limiter le changement climatique en cours, la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) et le stockage de carbone sont des objectifs d'importance majeure aussi bien au niveau mondial que national. Les forêts et, plus largement, la filière forêt-bois sont considérées comme un secteur stratégique pour l'atténuation du changement climatique, notamment grâce à leur capacité de stockage de carbone et donc d'atténuation de l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Leur utilité s'explique par un effet combiné de stockage dynamique et réversible du carbone dans les écosystèmes et les produits issus de la filière et un effet de substitution cumulative et définitivement acquise, résultant de l'usage du bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents, non renouvelables et présentant des bilans carbone moins favorables.

Dans ce contexte, le Ministère français de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (MAAF) a confié à l'INRA la réalisation d'une étude sur les leviers forestiers permettant d'atténuer les émissions nettes de CO₂ de la France. L'étude propose un mode de calcul permettant d'évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de CO₂ lié à la filière forêt-bois française, aux horizons 2020, 2030 & 2050. Elle concerne les forêts de France métropolitaine, à la fois les forêts disponibles pour la production de bois, au sens où les définit l'inventaire des ressources forestières mis en œuvre par l'IGN, les industries qui transforment sous diverses formes les produits ligneux qui en sont issus, et les acteurs sociaux qui contribuent directement à cette chaîne de production primaire et de transformation, cet ensemble constituant la « filière forêt-bois ». L'étude confirme l'importance de la compensation d'une diminution du stockage de carbone dans l'écosystème due à un accroissement des prélèvements forestiers, par un stockage proportionnellement moindre dans les produits bois et un effet de substitution dû au remplacement par le bois de matériaux et énergies fossiles au bilan carbone moins favorable. A ce stade, l'étude met également en lumière la complexité des mécanismes en jeu et les limites des règles de calcul nécessaires pour une telle évaluation. Une méthode permettant de dépasser certaines de ces limites est finalement proposée en s'appuyant notamment sur des scénarios de gestion forestière et de climat différenciés. Cette méthode est actuellement mise en œuvre dans le cadre du prolongement de cette étude.

Les émissions de CO₂ et le stockage de carbone dans la filière forêt-bois

Aujourd'hui, les forêts et la filière forêt-bois sont considérées comme un secteur d'activité stratégique pour l'atténuation du changement climatique (Madignier *et al.*, 2014)¹, combinant un effet de stockage dans les écosystèmes forestiers, dans les produits-bois et un effet de substitution du bois à des matériaux et énergies fossiles plus largement émetteurs de CO₂. Au cours des années récentes, de nombreuses études nationales ont été consacrées à des projections de l'évolution des ressources forestières et des récoltes de bois d'ici 2020 ou 2030, et à leurs impacts sur le bilan national d'émissions de gaz à effet de serre. Les raisonnements intégrant l'atténuation des changements climatiques y ont une place primordiale. Dans cette optique, cette étude vise à affiner le bilan carbone (C) forestier proposé dans le rapport CGAAER, en considérant 4 leviers d'atténuation des émissions de CO₂ par la forêt, deux concernant le stockage de carbone et les autres la substitution d'émissions de carbone fossile. On s'appuie ici sur une revue de littérature internationale en vue d'identifier les valeurs des coefficients à prendre en compte et leur plage de variation potentielle.

Les effets de stockage

• **Le stockage du carbone dans l'écosystème forestier** qui résulte de sa capacité à absorber du CO₂ de l'atmosphère et qui concerne la biomasse vivante, aérienne et souterraine, le bois-mort et les sols forestiers. Ce dernier compartiment « sol » est d'autant plus important à prendre en compte que les horizons de projection sont éloignés.

C'est un stock de carbone de première importance, sensible au climat, au type de sol, et aux modes de gestion (dont reboisement, changements d'essence).

• **Le stockage du carbone dans les produits-bois ou à base de bois.** L'usage qui est fait du bois et la durée de vie des produits pérennes qui en sont issus sont les variables clés du stockage.

Les effets de substitution

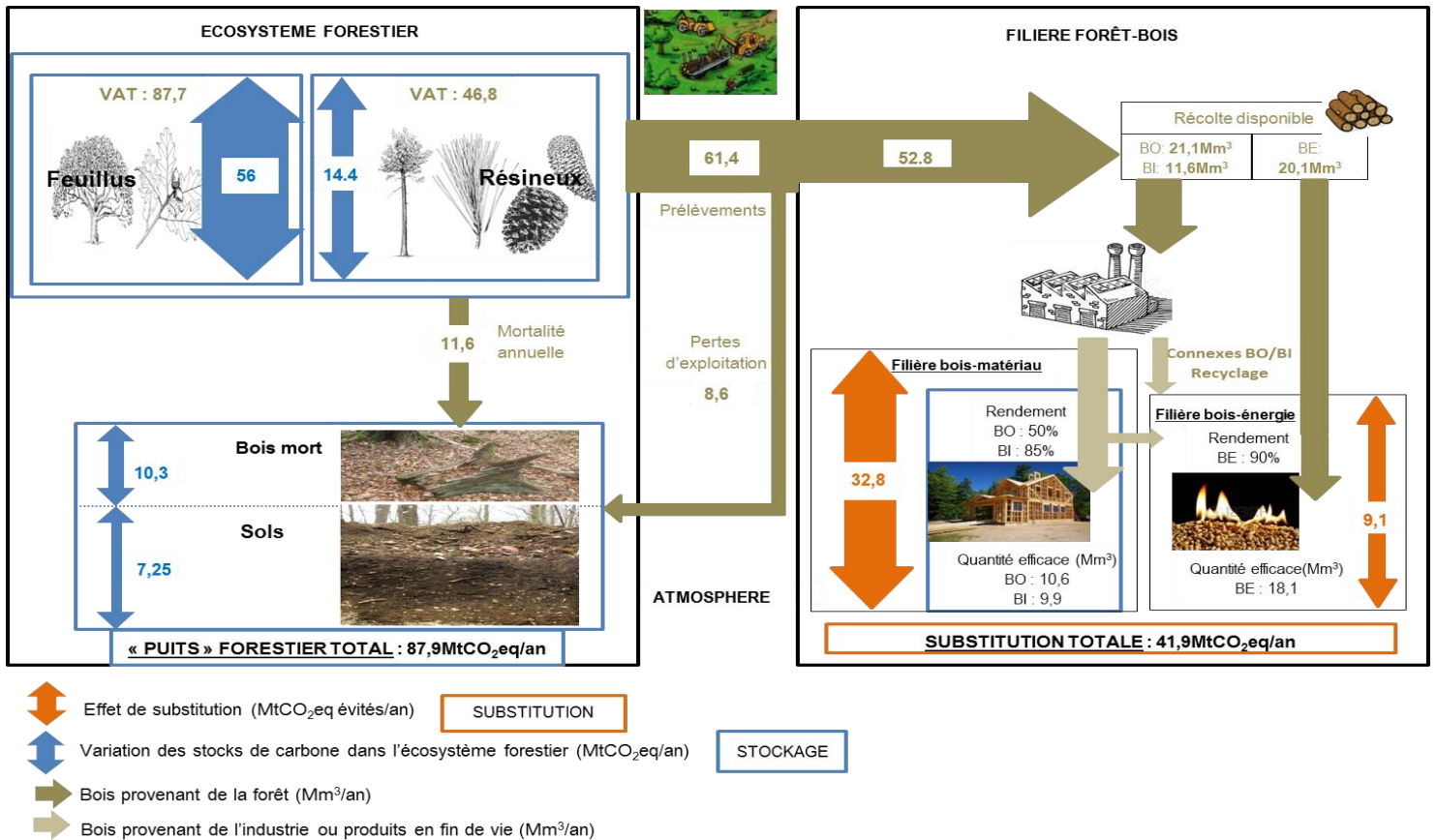
Les effets de substitution résultent de l'usage du bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents, non renouvelables et présentant des bilans carbone moins favorables. Par construction, les phénomènes de substitution, centraux pour comprendre le rôle de la forêt et de ses produits dans l'atténuation du changement climatique, n'apparaissent pas dans l'approche de reportage des bilans d'émissions par secteurs d'activité de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). Leur évaluation est délicate, car elle suppose de comparer des filières complètes de production qui, selon les principes de l'Analyse de cycle de vie (ACV), vont jusqu'au produit fini ou jusqu'au service rendu : les coefficients de substitution dépendent ainsi du contexte industriel national et varient dans le temps avec la stratégie des entreprises (amélioration des procédés et bassins d'approvisionnement). Il existe deux grands types de substitution :

• **La substitution-énergie**, qui correspond à la quantité d'émissions de CO₂ économisée par l'usage du bois-énergie plutôt que d'énergies de référence (fuel, gaz, charbon, mix électrique ou énergétique national...)

• **La substitution-produits**, qui correspond à la quantité d'émissions de CO₂ évitée par le recours à un procédé-bois plutôt qu'à un procédé de référence (béton, acier, plâtre, aluminium...). L'usage du bois, en alternative à des matériaux et filières concurrents permet d'économiser des quantités très importantes d'émissions de gaz à effet de serre.

¹ Madignier *et al.*, 2014. *Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique*. Rapport CGAAER, Paris.

Figure 1 – Flux de matière et de CO₂ aux différents stades de la filière forêt-bois française en 2013
(VAT=Volume aérien total, BO=Bois d'œuvre, BI=Bois d'industrie, BE=Bois énergie)



* La variation de stock de carbone dans les produits bois a été estimée à 0 et -0,1 MtCO₂eq/an pour BO et BI respectivement et n'apparaît donc pas dans les flux de CO₂ de la filière en 2013.

La figure 1 propose une représentation de la filière forêt-bois française mettant en avant ses flux de matière entre les différents stades de la filière (en Mm³/an) et les flux de CO₂ relatifs aux leviers identifiés dans l'étude (en MtCO₂ équivalents/an). Elle s'appuie sur notre réévaluation du bilan carbone forestier qui avait été proposée par le rapport Madignier *et al.* (2014) pour l'année 2013.

Coefficients et hypothèses issus de la revue de l'état de l'art international

En vue d'affiner les évaluations du bilan carbone de la filière proposées dans le rapport CGAAER (Madignier *et al.*, 2014), nous avons procédé à une revue de la littérature scientifique internationale visant à identifier les coefficients de stockage et de substitution et leurs plages de variation, relatifs aux 4 leviers forestiers retenus pour l'atténuation des émissions de CO₂: stockage de carbone dans l'écosystème forestier (biomasse et sols) et dans les produits bois, substitution bois-énergie et substitution bois-matériau.

L'objectif de cette revue était d'identifier ceux qui pouvaient être applicables dans le contexte français. En effet, les coefficients de stockage et de substitution couramment utilisés en France sont rarement discutés au regard de cette littérature internationale.

Stockage dans l'écosystème forestier

Dans l'écosystème forestier, nous avons distingué les compartiments de la biomasse vivante (aérienne et souterraine), du bois mort et des sols.

• Biomasse forestière

En France, dans le reportage national CCNUCC de gaz à effet de serre réalisé par le CITEPA, la conversion en stocks de carbone des volumes bois-forêt tige, calculés par l'inventaire forestier national, utilise une série de coefficients permettant d'estimer les volumes de branches et menus bois (sections de bois inférieures à 7 cm de diamètre) et des racines, puis de convertir ces volumes en matière sèche et, enfin, en carbone.

Les valeurs moyennes des coefficients de conversion volume inventorié-carbone du reportage national CITEPA ont été discutées et comparées aux valeurs homologues repérées dans la revue de littérature pour les autres pays forestiers. Les gammes de valeurs retenues dans notre étude sont identifiées dans le tableau 1 :

- Le BEF²branches est le facteur de conversion permettant d'ajouter les branches et les sections de moins de 7 cm de diamètre au volume bois-forêt IGN (découpe 7 cm), pour obtenir le volume aérien total (découpe 0 cm).

² BEF= Biomass expansion factor

- Les coefficients intégrés permettent la conversion du volume aérien total en masse de CO₂ exprimés en tCO₂/m³VAT³
- L'infradensité et la concentration en carbone des produits bois utilisés servent par la suite dans les calculs des coefficients de substitution.

Ces coefficients ont été identifiés pour les feuillus et résineux séparément.

• **Bois-mort**

L'IGN réalise, depuis plusieurs années et dans le cadre de son protocole de mesures standard sur chaque placette, un relevé du bois-mort (en séparant bois-mort sur pied et au sol). Cette information peut être utilisée dans un système de projection, si l'on sait simultanément estimer les entrées de bois-mort (mortalité annuelle, dégâts d'exploitation provoqués par les coupes auxquels s'ajoutent une mortalité de fond) et les sorties (décomposition du bois-mort). La recherche a été orientée pour renseigner la vitesse de décomposition annuelle du bois-mort ainsi que la dynamique d'évolution des stocks de carbone dans ce compartiment.

La vitesse de déstockage du carbone dans le bois mort est ici supposée suivre une dynamique exponentielle, avec une demi-vie estimée à 30 ans. Ceci signifie qu'en moyenne, sur toutes les forêts françaises de métropole, la moitié du carbone stocké dans une pièce de bois-mort abandonnée en forêt y est encore présente après 30 ans. Le choix d'une demi-vie longue réduit le coefficient de sortie annuelle (ici, la vitesse de dégradation) et augmente le stock moyen.

Le temps imparti par l'étude étant réduit, la recherche documentaire permettant d'actualiser les connaissances sur ce sujet n'a pas été conduite dans cette étude, elle le sera dans le deuxième volet.

• **Sols forestiers**

La question du stockage de carbone dans les sols est aujourd'hui cruciale. Or, la plupart des évaluations du stockage de carbone en forêt ne prennent pas en compte les sols forestiers. Dans la mesure du possible, nous avons tenté de les intégrer dans l'estimation du bilan carbone de la filière, en nous appuyant sur les options ressorties de l'état de l'art international. Parallèlement, les résultats des valeurs moyennes de stockage de C dans les sols forestiers observées sur le réseau RENECOFOR, indiquant une augmentation du carbone des sols entre les deux campagnes d'observation espacées de 15 ans, sont également discutés. Sur la base de cette analyse, et en première approche, nous considérons ici que les sols forestiers se comporteraient en moyenne comme des puits de carbone, en lien avec les usages anciens dont ils portent les marques (Dupouey *et al.*, 2002)⁴. Les données du réseau RENECOFOR mettent en lumière, au niveau national, une vitesse de stockage dans les sols, proche de 22 MtCO₂eq/an. Cependant, les placettes de ce réseau n'étant pas nécessairement représentatives des forêts

françaises, il n'est pas aisé d'évaluer la façon dont les sols RENECOFOR se distinguent de la moyenne des sols métropolitains. De même, il est actuellement difficile de préciser les causes de cette augmentation même si elle est observée dans d'autres pays européens avec des ordres de grandeur comparables. Dans cette étude, nous avons retenu, comme valeur moyenne nationale, le tiers de la valeur observée sur le réseau RENECOFOR. Nous supposons que, du fait des impacts du réchauffement sur ces processus, cette vitesse devrait diminuer dans le futur selon une dynamique bornée et convergeant exponentiellement. Cette hypothèse reste à approfondir par la suite.

Tableau 1 – Plage de variation des coefficients identifiés dans la littérature internationale et hypothèses pour l'estimation du stockage de carbone dans l'écosystème forestier

Stockage de carbone dans l'écosystème forestier :		Biomasse feuillus	Biomasse résineux	Bois mort	Sol
Projet CARBOFOR (Loustau <i>et al.</i> , 2004)	Gamme des BEF branches	1,5-1,6	1,25 - 1,35		
	Valeur centrale (sans unité)	1,56	1,3		
	Gamme des coefficients intégrés	1,03 - 1,38	0,71 - 1,05		
	Valeur centrale (tCO ₂ /m ³ VAT)	1,2	0,9		
Etude Colin, 2014	Gamme des teneurs en C de la matière sèche	0,45-0,5	0,45-0,5		
	Valeur centrale	0,475	0,475		
Projet CARBOFOR (Loustau <i>et al.</i> , 2004)	Gamme d'infradensité des bois	0,52 - 0,58	0,36 - 0,44		
	Valeur centrale (t/m ³)	0,55	0,40		
Etude de la littérature en cours	Taux de décomposition annuelle (%)			2,3	
	Demi-vie			30 ans	
Bois-mort : IGN Sols : Réseau RENECOFOR	Stock initial (MtCO ₂ eq)			430	5520
	Vitesse de stockage C (MtCO ₂ eq/an)				1/3 vitesse RENECOFOR 7,25

Stockage dans les produits bois

La littérature consultée sur l'estimation des stocks de carbone dans les produits bois permet de faire un point sur les durées de vie de ces stocks de C dans les produits, ainsi que sur la dynamique d'évolution des stocks dans la filière, en contributions absolues et relatives, et en distinguant éventuellement des sous-filières jugées pertinentes.

En vue d'estimer le stockage de carbone dans les produits bois, deux systèmes dynamiques indépendants, pour le bois d'œuvre (BO) et le bois d'industrie (BI), ont été considérés, sans échange avec l'extérieur du territoire métropolitain.

Ces systèmes sont alimentés chaque année par les prélèvements de produits et se vident selon une loi exponentielle telle que la durée de demi-vie des produits est de 20 ans pour le BO ou de 5 ans pour le BI. Ces 2 systèmes sont en outre supposés être en 2013, sensiblement à l'équilibre, c'est-à-dire que les entrées de produits compensent exactement les sorties.

Les estimations des durées de vie des produits sont celles utilisées dans le rapport Madignier *et al.* (2014), l'état de l'art sur le stockage de C dans les produits bois devant être approfondi.

³ VAT = Volume aérien total

⁴ Dupouey J.-L., Dambrine, E., Laffite, J.-D., Moares, C. 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 83: 2978-2984.

Tableau 2 – Hypothèses issues de la littérature internationale pour l'estimation du stockage de C dans les produits bois

Stockage de carbone dans les produits bois		BO	BI
Etude Colin (2014) Rapport Madignier <i>et al.</i> (2014)	Taux de ventilation de la récolte (%)	40	22
	Stock initial (MtCO ₂ eq/an)	300	80
Etude de la littérature en cours	Demi-vie	20 ans	5 ans
	Taux de retour dans la filière (%)	3,4	12,9

Effets de substitution

L'état de l'art a permis de fournir des éléments généraux sur l'estimation des coefficients de substitution (méthodes employées, hypothèses de calcul, valeurs obtenues) dans différents pays. La nature et l'efficacité des procédés de transformation ont été examinés dans l'état de l'art et pris en compte dans le choix des coefficients de substitution applicables au contexte national français. Cette substitution reste aujourd'hui difficile à quantifier puisque, pour déterminer avec précision les émissions GES évitées, il est nécessaire d'estimer correctement les émissions de GES selon les deux options alternatives.

• Substitution bois-matériaux

L'identification, dans la littérature internationale, des coefficients de substitution matériaux pertinents dans le contexte français s'est basée sur la méta-analyse de Sathre et O'Connor (2010)⁵, en ne retenant que 28 des 36 études qui y sont considérées : 6 études comparant la construction-bois à la construction métallique ont été écartées ainsi que 2 études proposant des valeurs anormalement élevées. En revanche, nous avons conservé les valeurs des études comparant des fabrications d'utilités en bois plutôt qu'en métal, comme les pylônes de lignes électriques.

Les coefficients de substitution moyens tirés de l'étude de Sathre et O'Connor et exprimés en tC/tC ont été convertis en tCO₂/m³ de produit en considérant 3 niveaux d'infradensité et 3 niveaux de teneur en carbone dans les bois, issus de la littérature. Comme la construction utilise massivement les résineux, nous avons considéré la gamme d'infradensité correspondante issue de l'état de l'art international, soit 0,36 à 0,44 t/m³.

• Substitution bois-énergie

Une autre option de substitution est de brûler le bois pour remplacer les énergies fossiles. Pour l'estimation des coefficients de substitution-énergie, nous nous sommes

⁵ Sathre, R. & O'Connor, J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13 (2): 104-114, ainsi que Sathre, R. & O'Connor, J., 2010. A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts. 2nd edition. Technical report n° TR-19R, FPIInnovation, 123 pages.

appuyés sur le travail d'Oliver *et al.* (2014)⁶: émissions évitées par la combustion du bois en substitution du gaz, du fuel et du charbon. Nous avons considéré que, pour l'énergie en France, nous consommerions essentiellement du bois de feuillus en habitats individuels déjà pourvus de chaudière et qu'il remplacerait du fuel à 80 % et du gaz à 20 % (pas d'électricité remplacée). Dans ce cadre, nous avons appliqué un mix fuel-gaz à 80-20% aux 3 niveaux retenus pour l'infradensité des bois feuillus.

Tableau 3 – Gammes de variations des coefficients de substitution pour l'estimation des effets de substitution bois-matériau et bois-énergie.

Effets de substitution		Substitution bois-matériau		Substitution bois-énergie
		BO	BI	BE
Etude Colin (2014) Rapport Madignier <i>et al.</i> (2014)	Taux de ventilation de la récolte	40%	22%	38%
	Rendements	50%	85%	90%
Bois matériau : Méta-analyse de Sathre et O'Connor, 2010	Gamme des coefficients de substitution	0,59-3,47		0,37-0,64
		Bois-énergie : Oliver <i>et al.</i> , 2014	Valeur centrale (tCO ₂ eq évités/m ³ -bois)	1,6

Résultats (provisoires) du bilan carbone forestier en 2013 et 2030

Sur ces bases, auxquelles s'ajoutent les hypothèses complémentaires reportées au tableau 4 en matière de coefficients de stockage et de substitution, nous proposons des estimations du bilan carbone forestier. Les résultats sont projetés aux horizons 2013 (cf. figure 1), 2030 (tableau 4) et 2035 (horizons pertinents avec ce type d'approche), selon les modalités du scénario dynamique de l'étude Colin (2014)⁷ et avec les valeurs centrales des plages de variation des coefficients de stockage et de substitution. Le potentiel de stockage de l'écosystème forestier et des produits bois (« puits » forestier total), ainsi que le potentiel de substitution par la filière aval (substitution totale) ont ainsi été estimés.

Le scénario dynamique de l'étude Colin (2014) envisage une forte augmentation des prélèvements de bois aux horizons considérés dans l'étude : 2020 et 2030.

⁶ Oliver C.D., Nedal N., Lippke B., McCarter J., 2014. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation with Wood and Forests, *Journal of Sustainable Forestry*, 33:3, 248-275.

⁷ Colin, A. 2014. *Emissions 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* - Tâches C et D. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois (Rapport final, mars 2014 Convention MEDDE.DGEC/IGN n°2200682886). IGN, Nancy (France), 55p.

Avec l'ensemble des choix de représentation et paramétrages retenus, et en dépit de la forte variabilité des valeurs possibles de certains coefficients, nous pouvons estimer, en première approche, l'impact complet de la filière forêt-bois en termes d'atténuation du changement climatique, en sommant effets de stockage et de substitution, à environ 130 MtCO₂eq/an en 2013, 146 en 2030 et même 150 en 2035. La forte augmentation de récolte envisagée dans le scénario dynamique de l'étude Colin (2014) induit un changement de poids respectif du stockage et de la substitution dans le bilan d'ensemble. Ce bilan reste dominé par le stockage en 2013 avec 87,9 MtCO₂eq/an ; en 2030 avec 77,5 MtCO₂eq/an, mais ne l'est plus en 2035, avec 73,6 MtCO₂eq/an. Même une forte augmentation de la récolte forestière pénaliserait finalement peu le stockage dans

l'écosystème forestier, compte tenu de la situation actuelle des forêts françaises (expansion rapide et tendance à la capitalisation) et de la compensation partielle (et transitoire) par les stocks dans les produits et le bois-mort. Cette estimation globale ainsi que les contributions relatives du stockage et de la substitution, sont sensibles aux plages de variation des différents coefficients identifiés à partir de l'état de l'art international (cf. tableaux 1, 2 et 3), les coefficients de substitution présentant notamment une large gamme de variation. De même, ces estimations sont sensibles aux différentes hypothèses évoquées auparavant, pour le calcul du bilan carbone. Ces variations et les gammes d'incertitude auxquelles elles correspondent doivent donc être prises en compte dans l'utilisation des résultats de la présente étude.

Tableau 4 – Bilan de carbone estimé en 2030 selon le scénario dynamique de l'étude Colin (2014) et les hypothèses retenues en matière de coefficients de stockage et de substitution.

Stockage net		Substitution					
MtCO ₂ eq/an		MtCO ₂ eq évités/an					
variation du stock		Catégorie	Rendement	Q. efficace	Substit.		
			%	Mm ³	basse	moyenne	haute
produits BO	5,5						
produits BI	3,7						
sols	6	BO	50%	17,4	10,3	27,9	60,3
bois-mort	11,2	BI	85%	16,3	9,6	26,1	56,4
		BE	90%	29,7	11,0	15,0	19,0
biomasse résineux	6,9	Connexes BO		17,4	—	—	
		Connexes BI		2,9	—	—	
biomasse feuillus	44,3	Recyclage		?	—	—	
		Total BE		50,0			
Puits forestier total	77,5	Substitution totale			68,9		

La substitution est calculée en multipliant la quantité efficace de produit mis en œuvre (Mm³) par le coefficient de substitution correspondant à la valeur haute, moyenne ou basse de la gamme de variation obtenue par l'étude de la littérature.

Afin de discuter le bilan de carbone forestier tel que calculé dans le rapport CGAAER (Madignier *et al.*, 2014), nous avons mobilisé les coefficients issus de la littérature et proposé une évaluation de ce bilan carbone pour 2013 ainsi qu'une projection aux horizons 2030 et 2035. Nous avons choisi des valeurs pertinentes dans notre contexte national, notamment en ce qui concerne les coefficients de substitution et de stockage produits. Les plages de variabilité des valeurs retenues et les autres hypothèses nécessaires au calcul ont été spécifiées précédemment. Nos calculs ont donc repris l'esprit des calculs de Madignier *et al.* (2014), en les appliquant aux valeurs actuelles et projetées par le modèle de ressource de l'IGN par classe de diamètre (Colin, 2014), appelé MARGOT (*M*atrix *M*odel of *f*orest *R*esource *G*rowth and *D*ynamics *O*n the *T*erritory scale), notamment dans le but d'obtenir des données plus précises sur la quantité de bois disponible dans les différents usages.

Comme spécifié dans Colin, 2014, « le modèle de l'IGN est un modèle démographique simulant l'évolution de la ressource moyenne d'un territoire (allant de la région au pays) en fonction de la croissance des arbres, de la

mortalité naturelle et des prélèvements de bois. Il est basé sur les observations statistiques collectées sur les placettes de l'inventaire forestier national (IFN). L'IGN utilise classiquement ce modèle pour l'étude des ressources forestières et l'évaluation des disponibilités en bois. Ce type de modèle est particulièrement robuste pour projeter à court et moyen terme les états de systèmes à forte inertie comme la forêt française, car ils s'appuient sur des grands nombres d'observations sur le terrain. Le modèle par classe de diamètre de l'IGN est appliqué à l'ensemble des forêts, à l'exception des peupleraies cultivées équiennes » (Colin, 2014, p. 12-15). Une des limites du modèle MARGOT est sa probable difficulté à simuler correctement des évolutions extrêmes et rapides (comme, par exemple, sécheresse ou dépérissement massifs, tempête majeure). En effet, les paramètres de dynamique des modèles (croissance, mortalité, etc.) ne sont pas explicitement liés aux drivers du système. De même, les modèles de ressource à large échelle spatiale tels que MARGOT livrent des projections sous hypothèses, et pas des prédictions opérationnelles.

Ils permettent d'évaluer les conséquences qu'auraient différentes décisions politiques ou de gestion à l'échelle des territoires. Pour cette raison, les modèles empiriques pour des projections à long terme où les effets des changements globaux deviennent majeurs doivent être utilisés avec précaution (Colin, 2014, p. 13).

Pour une méthode permettant d'appuyer la conception de politiques stimulant la contribution forestière à l'atténuation du Changement Climatique aux horizons 2030 et 2050

Nos évaluations du bilan carbone forestier ne tiennent pas compte de plusieurs facteurs essentiels tels que l'évolution du climat ou de la gestion forestière. En effet, dans le contexte actuel, il conviendrait de prendre en compte les conséquences du changement climatique sur les peuplements forestiers et l'évolution de la ressource dans le bilan des émissions de GES de la filière forêt-bois. De même, dans le but de projeter ces résultats à des horizons plus lointains (2030 ou 2050), il serait nécessaire de fixer des trajectoires de gestion et de mobilisation de la ressource.

Du fait du caractère dynamique, non stationnaire et couplé des cycles du carbone, et ceci dans un nombre élevé de compartiments identifiés dans la filière, le travail réalisé ici montre d'ores et déjà l'intérêt qu'il y aurait à appuyer la réflexion sur les effets des orientations de politique, sur une méthode générique agencée autour de la modélisation et de l'analyse de scénarios explicites pour le climat et la gestion, s'appuyant sur les ressources scientifiques identifiées précédemment.

Pour ce faire, il faudrait faire évoluer le modèle de ressource MARGOT pour y intégrer, d'une part, les impacts du changement climatique sur l'évolution de la ressource forestière (avec 2 scénarios climatiques) et, d'autre part, les impacts des scénarios de gestion sur la nature et le niveau des prélèvements. Notre proposition méthodologique vise à organiser un ensemble de modèles cohérents autour du modèle MARGOT avec :

- Le modèle à base de processus GO+⁸ pour l'intégration des effets du changement climatique et la prise en compte mécaniste explicite du stockage dans le sol.

- Le modèle FFSM⁹ pour les dimensions économiques et la prise en compte du comportement des acteurs de la filière (ex. estimation des taux de ventilation de la récolte).

Tableau 5 – Points d'amélioration méthodologique pris en compte dans les prolongements de cette étude.

Coefficients de substitution	Une explicitation de la dépendance contextuelle des coefficients de substitution et une formalisation de leur dynamique sur plusieurs décennies seront réalisées afin de réduire l'intervalle d'incertitudes quant à ces estimations.
Durée de vie et dynamique d'évolution des stocks de C [Dans les catégories de produit et dans le bois mort]	Ces dimensions n'ont pas été approfondies dans ce premier volet et devront l'être par la suite.
Infradensité des bois	Les valeurs retenues pour les différentes essences (feuillus/résineux) devront être ré évaluées.
Valeurs de rendement pour les catégories BO, BI et BE entre la forêt et le produit mis en œuvre	Les coefficients de rendement identifiés : 50 %, 85 % et 90 % (pour BO, BI et BE respectivement) devront être mis à l'épreuve.
Taux de ventilation de la récolte BO BI et BE	La mise en œuvre d'un modèle de filière bois nationale devrait permettre de traiter ce volet de manière plus robuste.

Nous chercherons également à intégrer dans cette démarche les risques de catastrophes naturelles induites par le changement climatique et leurs effets sur les variations du stockage carbone dans la filière ainsi que sur le comportement des acteurs.

Le travail réalisé a aussi montré la nécessité d'améliorer la caractérisation de certaines dimensions du bilan carbone de la filière forêt-bois française, reprises dans le tableau 5. Ainsi, en complément des estimations réalisées pour ce travail, il est nécessaire de mettre en œuvre cette nouvelle méthode d'estimation par modélisation permettant de prendre en compte les différents paramètres évoqués ainsi que ces dimensions qui seraient à améliorer par la suite par une étude approfondie de l'état de l'art.

Pour en savoir plus :

Dhôte J.-F., Leban J.-M., Saint-André L., Derrien D., Zhun M., Loustau D., Achat D., Roux A., Schmitt B. (2016). *Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique*. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris : INRA-DEPE, 95 p.



⁸ Loustau, D., V. Moreaux, A. Bosc, P. Trichet, J. Kumari, T. Rabemanantsoa, J. Balesdent, C. Jolivet, B. E. Medlyn, S. Cavaignac and N. Nguyen-The (2012). A climate sensitive model of carbon transfer through atmosphere, vegetation and soil in managed forest ecosystems. AGU Annual Assembly, 2012, San Francisco, USA.

⁹ Lobianco, A., Delacote P., Cauria S., Barkaoui, A. (2016), "Accounting for active management and risk attitude in forest sector models. An impact study on French forests". Environmental Modeling and Assessment, 21(3): 391-405.