

LA FORÊT : STOCK DE CARBONE OU SOURCE D'ÉNERGIE ?

MATHIEU FORTIN – CHLOÉ PELLETIER – JESSICA FRANÇOIS – ANTHONY DUFOUR

Aujourd'hui plus que jamais, la forêt est au cœur des discussions sur le réchauffement climatique. À l'échelle planétaire, la forêt joue un rôle essentiel dans le cycle du carbone : sa production primaire brute absorbe 123 milliards de tonnes de carbone atmosphérique annuellement (Ciais *et al.*, 2013). En comparaison, les émissions mondiales dues à la combustion des ressources fossiles et au changement d'usage des terres représentent environ 9 milliards de tonnes de carbone chaque année. La photosynthèse est certes une formidable pompe à carbone. Toutefois, la respiration des végétaux, la décomposition de la matière organique et les incendies de forêt émettent presque autant de carbone que ce qui est séquestré (Ciais *et al.*, 2013).

Les flux du cycle du carbone varient passablement d'un pays à l'autre. Si une part importante des émissions anthropiques finit par s'accumuler dans l'atmosphère, la forêt de certains pays contribue néanmoins à réduire les émissions nationales de gaz à effet de serre. C'est notamment le cas de la France, où la forêt est un puits considérable de carbone : elle séquestre annuellement entre 10 et 15 % des émissions nationales (*cf.* CITEPA, 2015).

La substitution des énergies fossiles par des énergies dites renouvelables est une des stratégies envisagées pour réduire les émissions de carbone d'origine fossile (McKendry, 2002). Les pays européens doivent produire 20 % de leur énergie à partir de sources renouvelables à l'échéance de 2020 (Parlement européen, 2009). Si elle vient de forêts gérées, la biomasse forestière est considérée comme une énergie renouvelable (CDM 2006, annexe 18). Par ailleurs, le matériau bois peut aussi se substituer à des matériaux plus énergivores. De ce fait, la forêt et les produits bois constituent un triple levier d'action contre le réchauffement climatique :

- la photosynthèse séquestre le carbone de l'atmosphère en forêt,
- les produits bois récoltés prolongent le stockage du carbone durant leur durée de vie,
- ces mêmes produits bois peuvent se substituer aux carburants fossiles et aux matériaux énergivores.

Certaines études démontrent qu'il faudra des filières à bilan négatif, c'est-à-dire des filières qui absorbent plus de carbone qu'elles n'en émettent, pour atteindre l'objectif d'un réchauffement sous les 2°C à l'horizon 2100 (*cf.* van Vuuren, 2013) et la production d'énergie à partir de biomasse forestière pourrait en être une.

Cette dualité séquestration/biomasse énergie est bien présente en France. Au cours des dernières décennies, la forêt française est devenue un important puits de carbone (IFN, 2005). Toutefois, depuis 2008, l'ADEME a mis en place des programmes d'installation de chaudières à biomasse. Ces programmes ont connu un franc succès, si bien qu'aujourd'hui, on anticipe un manque d'approvisionnement en biomasse de plus de 20 millions de mètres cubes pour 2020 (MEDDE, 2014, chapitre 18).

Les deux fonctions de la forêt, séquestration du carbone et source d'énergie verte, ne peuvent pas être maximisées en même temps : une récolte accrue de biomasse pour alimenter la filière bois énergie se fait aux dépens de la séquestration de carbone en forêt et *vice versa*. Un arbitrage entre les deux stratégies est nécessaire à une échelle régionale, voire nationale. Le choix de privilégier l'une ou l'autre de ces deux fonctions dépend de plusieurs facteurs comme la demande en biomasse, la structure de la forêt, la croissance et le contexte énergétique. Il faut donc des outils qui permettent d'évaluer l'ensemble du système, de la croissance forestière jusqu'à la production énergétique. Ces outils impliquent des couplages entre des modèles de croissance forestière, des modèles de produits bois et des modèles de procédés.

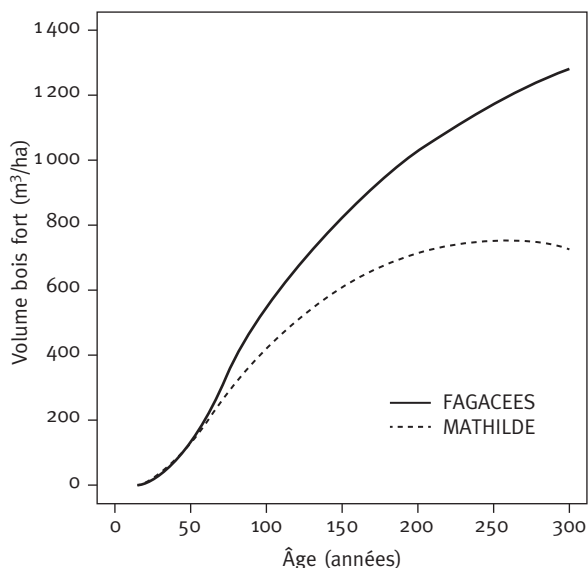
MODÉLISATION DE LA CROISSANCE FORESTIÈRE : LA SÉNESCENCE ET LE MÉLANGE D'ESPÈCES

Comme dans bien d'autres pays, on cherche à prévoir la contribution de la forêt française au bilan national de carbone en fonction de différents facteurs comme la gestion forestière, la demande en biomasse, les tempêtes et les sécheresses. Pour ce faire, il est nécessaire de recourir à des modèles de croissance qui permettent de prévoir ce que sera la forêt de demain. Les volumes prévus sont convertis en carbone par le biais de facteurs d'expansion de biomasse, d'infradensité et de teneur en carbone (cf. GIEC, 2003).

En Europe, les modèles de croissance ont longtemps été destinés à une échelle locale. Ils sont étalonnés à partir de placettes échantillons établies en forêts gérées. En France, ils ont notamment servi à définir des itinéraires sylvicoles (cf. Sardin, 2008) dont la fonction est de maximiser la production d'un certain assortiment de billons.

À une échelle régionale ou même nationale, la gestion forestière n'est pas entièrement conforme à ce que préconisent les guides de sylviculture. Alors que certains propriétaires gèrent leurs forêts de façon plus intensive, d'autres laissent la forêt évoluer sans aucun aménagement. Les modèles de croissance traditionnels arrivent alors difficilement à prévoir le ralentissement de la croissance et la phase de sénescence qui s'ensuit lorsque les peuplements arrivent à des âges avancés (figure 1, ci-dessous).

FIGURE 1
SIMULATIONS DE CROISSANCE
D'UN PEUPEMENT DE HÊTRE
SUR UN HORIZON DE 300 ANS
AVEC LES MODÈLES FAGACEES (DHÔTE, 1996)
ET MATHILDE (MANSO *et al.*, 2015a, 2015b)



Par ailleurs, ces modèles sont en très grande majorité conçus pour des peuplements monospécifiques. Or, les données de l'Inventaire forestier national démontrent que, dans une large proportion, les placettes contiennent plusieurs espèces d'arbres. L'utilisation de modèles devient alors impossible ou est sujette à des hypothèses fortes.

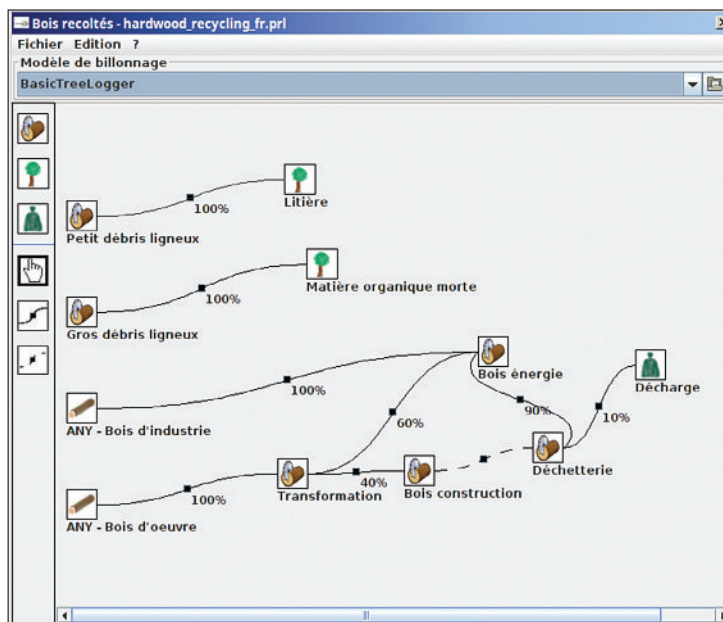
De nouvelles approches de modélisation émergent et se veulent plus intégratives. Les modèles par tiges individuelles, dans lesquels on prévoit la mortalité des arbres, la croissance des survivants et le recrutement de nouveaux individus ne sont pas récents (par exemple Stage, 1973), mais on essaie de plus en plus d'intégrer le mélange d'espèces dans les modules qui composent ces modèles. Ainsi, Manso *et al.* (2015a, 2015b) ont modélisé la mortalité et la croissance du Hêtre, du Chêne et du Charme en peuplements mélangés en tenant compte de la concurrence interspécifique.

La prise en compte de la sénescence dans ces modèles par tiges individuelles n'est pas explicite. Cette phase survient lorsque les pertes dues à la mortalité excèdent les gains engendrés par la croissance des survivants et par le recrutement. Ce comportement du modèle peut être vérifié *a posteriori* et s'avère cohérent dans plusieurs cas (*cf.* Monserud *et al.*, 2004 ; Fortin *et al.*, 2014). La figure 1 (p. 134) illustre le comportement de deux modèles dont l'un arrive à reproduire cette sénescence.

MODÉLISATION DES PRODUITS BOIS

Une fois les bois récoltés, on transforme les grumes et billons en produits finis de diverses natures. La filière industrielle est complexe car une grume peut contribuer à la création de plusieurs produits finis. Même lorsqu'un billon est de qualité suffisante pour produire du sciage, les

FIGURE 2
INTERFACE GRAPHIQUE DE L'OUTIL LERFOB-CAT
PERMETTANT DE SIMULER LES PRODUITS BOIS ET LEUR DEVENIR EN FIN DE VIE



résidus de la transformation représentent une proportion importante du volume initial. Ces résidus pourront être vendus à un transformateur qui produira des panneaux, du papier ou des granulés. Il existe donc de nombreux flux qui relient les divers transformateurs de la filière et on a toujours du mal à quantifier ces flux avec exactitude.

De plus, les produits ont des durées de vie variables selon leur nature, les produits de la construction étant utilisés plus longtemps que le bois énergie. En fin de vie, certains produits seront brûlés alors que d'autres seront recyclés. Les durées de vie ainsi que les flux au moment de la transformation et en fin de vie sont généralement estimés à dire d'expert. Pingoud *et al.* (2001) présentent une des rares méthodologies objectives pour déterminer la durée de vie moyenne des produits bois de la construction, qui a été estimée à 39 ans en Finlande.

Les outils informatiques permettant de simuler les produits bois lorsqu'on fait entrer une grume ou un certain volume de bois dans la filière sont limités en raison de la complexité des flux. Brunet-Navarro *et al.* (2016) en ont dressé une liste exhaustive dans un récent article. En France, l'outil LERFoB-CAT est une application informatique qui permet entre autres de simuler les produits bois (figure 2, p. 135) ainsi que les durées de vie et le devenir de ces produits en fin de vie (Fortin *et al.*, 2012).

PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DU BOIS

On estime aujourd'hui à plus de 3 milliards le nombre de personnes qui dépendent encore de la biomasse comme principale source d'énergie (Anenberg, 2013). Il existe plusieurs procédés permettant de produire de l'énergie à partir du bois, le plus connu étant la combustion, qui permet à haute température de produire de la chaleur et éventuellement de l'électricité avec un cycle à vapeur.

Le second procédé est la gazéification. La gazéification est aussi un procédé à haute température mais avec un apport d'air inférieur à la combustion. Dans les « fumées », il reste alors des gaz combustibles (CO , H_2 , CH_4). Ces gaz peuvent être valorisés dans un moteur à gaz pour produire de l'électricité et de la chaleur ou ils peuvent être convertis en biocarburant liquide ou autre. La gazéification a beaucoup été utilisée durant la Seconde Guerre mondiale pour pallier la pénurie de pétrole. Des gazogènes étaient alors installés dans les voitures.

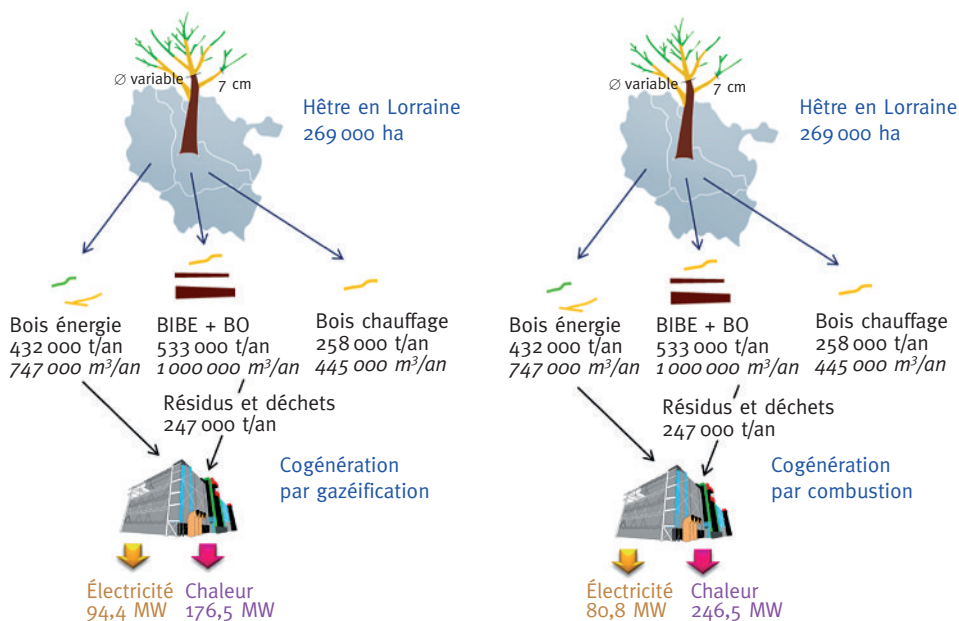
Un troisième procédé est la pyrolyse. La pyrolyse produit du charbon, des huiles (à ne pas confondre avec les corps gras, les huiles de bois sont plutôt un mélange de sucres et d'aromatiques) et des gaz. C'est également un procédé très ancien car on retrouve des dessins produits avec du charbon de bois (fusain) dans la grotte Chauvet qui datent de plus de 38 000 ans. À l'époque déjà, les hommes savaient contrôler la pyrolyse pour obtenir le bon charbon de bois nécessaire pour le fusain. La biohuile est une source intéressante de molécules chimiques et pourrait être « raffinée » au même titre que le pétrole dans des raffineries (modifiées). Les usines de Clamecy et de Prémercy dans la Nièvre étaient au milieu du XX^e siècle de formidables usines chimiques basées sur la pyrolyse du bois (Braque, 1949).

Enfin, le quatrième procédé thermique est la liquéfaction directe du bois. Dans ce procédé, le bois est chauffé jusqu'à des températures de l'ordre de 400 °C dans un solvant qui peut être les huiles de bois elles-mêmes, sous pression et le plus souvent avec des catalyseurs et de l'hydrogène. L'objectif est d'augmenter la formation de liquide (de bio-huile) à partir du bois et de diminuer la teneur en oxygène présent dans ces liquides. Pour plus de détails sur les quatre procédés décrits précédemment, les lecteurs peuvent consulter l'article de Déglise (1982) publié dans cette revue et qui reste plus que jamais d'actualité.

UN COUPLAGE DE MODÈLES POUR COUVRIR L'ENSEMBLE DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS-ÉNERGIE

Une chaîne de modèles impliquant un modèle de croissance forestière, un modèle de produits bois et un modèle de gazéification a donc été utilisée par François *et al.* (2014) afin de prédire l'ensemble des flux matière et énergie entrants et sortants d'une filière forêt-bois-énergie. En particulier, deux filières de cogénération d'électricité et de chaleur ont été étudiées dans le but de représenter des installations fictives de gazéification ou de combustion qui pourraient venir alimenter les réseaux de chaleur en Lorraine. La technologie de gazéification modélisée a été développée dans les années 1980 par l'entreprise TNEE en collaboration avec les universités de Nancy et de Compiègne. Le couplage forêt-procédé permet de quantifier le rendement énergétique des installations, les bilans massiques (figure 3, ci-dessous) et les éléments présents dans le bois comme le carbone, l'azote, le soufre, le phosphore et le potassium sur l'ensemble de la filière (François *et al.*, 2014) ainsi que la surface de forêt requise pour atteindre une quantité donnée d'énergie. Ce modèle permet d'estimer un potentiel de production de chaleur et d'électricité des hêtraies en Lorraine en fonction du type de procédé envisagé (gazéification ou combustion) et selon les scénarios de gestion forestière et d'usage des bois (François, 2014). Les hêtraies lorraines pourraient répondre au besoin de chaleur d'environ 50 000 foyers (environ 10 installations de gazéification d'une capacité unitaire de 10 MW électriques et 18 MW thermiques).

FIGURE 3
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET DE CHALEUR SUR UN AN
EN VALORISANT LA TOTALITÉ DE LA SURFACE DE HÊTRE DISPONIBLE EN LORRAINE
EN COGÉNÉRATION BIOMASSE,
EN CONSIDÉRANT UN ITINÉRAIRE SYLVICOLE CLASSIQUE ET LA RÉCOLTE DES MENUS BOIS :
RÉSULTATS POUR LA GAZÉIFICATION (À GAUCHE) ; RÉSULTATS POUR LA COMBUSTION (À DROITE).
 Les tonnages sont exprimés en biomasse anhydre.
 (BIBE : bois d'industrie et bois énergie ; BO : bois d'œuvre) (François, 2014 modifié)

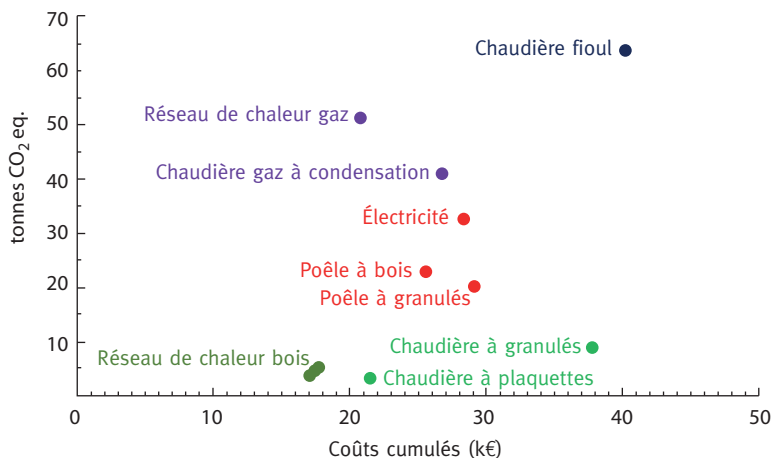


Ce couplage permet également d'étudier la performance environnementale de la filière. Dans un projet impliquant le laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP) et le laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), mais aussi l'institut EIFER (laboratoire commun entre EDF et l'université de Karlsruhe en Allemagne) et le laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), nous avons évalué plusieurs scénarios de combustion du bois. À partir de données d'expérimentation, nous avons modélisé le procédé de combustion selon divers scénarios de combustibles bois, tels que le bois bûche, les plaquettes forestières et les granulés. Plusieurs modes de production, distances de transport et technologies de combustion incluant le poêle individuel, à bûche ou à granulés et la chaudière automatisée à plaquette forestière, ont aussi été considérés dans la modélisation.

L'impact environnemental de la filière par combustion est quantifié par l'approche standardisée dite de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (ISO 14040-46:2006). Cette approche permet d'évaluer les impacts environnementaux à partir des flux matière et énergie échangés entre l'environnement et le système sur l'ensemble de son cycle de vie. Ces impacts sont exprimés par un certain nombre d'indicateurs, le réchauffement climatique étant le plus connu d'entre eux. L'ACV est utilisée sous forme référentielle, c'est-à-dire en comparant les flux d'une filière par rapport à ceux d'une autre filière.

Par cette approche ACV, nous avons démontré que les polluants, notamment le monoxyde de carbone et les composés aromatiques, avaient un impact non négligeable sur le réchauffement climatique (figure 4, ci-dessous) (Pelletier *et al.*, soumis). Lorsqu'on les compare à des combustions basées sur le mazout ou le gaz naturel, les procédés de combustion du bois peuvent être plus chers. En fait, seul un procédé de combustion central basé sur un réseau de chaleur semble être plus économique, mais le coût de cette technologie dépend de la longueur et de la densité du réseau. Par contre, la combustion du bois a toujours un impact plus faible sur le réchauffement climatique, même lorsqu'on la compare à la solution chauffage électrique, pourtant faiblement carbonée en France du fait de la prépondérance du nucléaire dans le mix électrique.

FIGURE 4 **POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL SUR UNE PÉRIODE DE 20 ANS POUR DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE CHALEUR EN FONCTION DE LEURS COÛTS (INVESTISSEMENT, ENTRETIEN ET COMBUSTIBLE). Toutes ces valeurs sont appliquées pour le chauffage d'une maison de 100 m² et la production d'eau chaude pour 4 personnes durant 20 ans dans une zone climatique telle que la Lorraine.**



CONCLUSIONS

Le passage aux énergies vertes est inévitable mais il n'est pas sans conséquence pour l'environnement. Les trois leviers d'action de la forêt et des produits bois ne peuvent être actionnés simultanément. Une maximisation du stockage dans la biomasse se fait au détriment des produits bois et de la substitution et *vice versa*. Par ailleurs, la biomasse ne peut séquestrer indéfiniment et à terme, on peut anticiper une saturation du puits ou même des émissions en cas de perturbations majeures.

Le couplage de modèles est nécessaire pour évaluer le bilan environnemental de politiques forestières visant à favoriser l'un ou l'autre des trois leviers d'action de la forêt et des produits bois. Le LRGP et le LERFoB travaillent à construire des modèles et à les assembler de façon à pouvoir couvrir l'ensemble de la filière, de la forêt jusqu'à la production d'énergie.

Tous ces bilans restent partiels parce qu'ils reposent sur certaines hypothèses comme la distribution des structures forestières à l'équilibre et l'utilisation de modèles de croissance conçus pour des peuplements réguliers et monospécifiques (cf. François *et al.*, 2014). L'amélioration des modèles, incluant la prise en compte des peuplements mélangés et la phase de sénescence, permettra d'obtenir des bilans plus réalistes. Ce travail sera prochainement amorcé dans le cadre d'un projet financé par l'ADEME avec Irstea, l'ONF, le LERFoB et le LRGP. Ces nouveaux modèles devraient s'adapter aux données de l'Inventaire forestier national de façon à fournir des estimations à partir de la forêt française telle qu'elle est actuellement. Par ailleurs, la quantification de l'incertitude associée aux prévisions des modèles demeure un enjeu fondamental.

Dans le cadre du projet FORÊVER, financé par le CNRS (www.forever-biomass.com), nous développons actuellement des couplages encore plus complets qui associent des modèles mis au point par le laboratoire Interactions Sol Plante Atmosphère (ISPA Bordeaux), le LERFoB et le LRGP afin de décrire le bilan carbone de la graine à l'usage final du bois, à l'échelle d'un territoire et sur plusieurs révolutions forestières.

Mathieu FORTIN
INRA, AgroParisTech
LERFoB
14 rue Girardet
CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(mathieu.fortin@agroparistech.fr)

Chloé PELLETIER – Jessica FRANÇOIS –
Anthony DUFOUR
CNRS, Université de Lorraine, ENSIC
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
ENSIC
1 rue Grandville
BP 20451
F-54001 NANCY CEDEX

Remerciements

Les auteurs remercient le CNRS pour le financement du projet FORÊVER et l'ADEME pour le financement du projet GESFOR. L'UMR 1092 LERFoB bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'excellence ARBRE). Nous tenons également à remercier deux réviseurs anonymes pour leurs commentaires constructifs.

La thèse de Jessica François a été financée par la fédération Jacques Villermaux (financement PPF) et conduite en collaboration entre le LRGP, l'Institut Jean Lamour, le LERMAB et le LEMTA. La thèse de Chloé Pelletier a été financée par le CNRS (par l'institut INSIS) et conduite en collaboration entre le LRGP, le LERFoB, le CIREC et l'ISPA. Nous remercions ici l'ensemble des acteurs (nombreux) de ces deux thèses.

BIBLIOGRAPHIE

- ANENBERG (S.C.), BALAKRISHNAN (K.), JETTER (J.), MASERA (O.), MEHTA (S.), MOSS (J.), RAMANATHAN (V.). — Cleaner Cooking Solutions to Achieve Health, Climate, and Economic Cobenefits. — *Environment Science and Technology*, 47, 2013, pp. 3944-3952.
- BRAQUE (R.). — Les Industries de la carbonisation du bois en France. — *L'information géographique*, 13, 1949, pp. 28-33.
- BRUNET-NAVARRO (P.), JOCHHEIM (H.), MUYS (B.). — Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review. — *Global Change Biology*, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13235.
- 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. Octobre 2015. — Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), 2015.
- CDM. — Clean Development Mechanism (CDM) Executive Board report (EB23). — 2006.
- CIAIS (P.), SABINE (C.), BALA (G.), BOPP (L.), BROVKIN (V.), CANADELL (J.), CHHABRA (A.), DEFRIES (R.), GALLOWAY (J.), HEIMANN (M.), JONES (C.), LE QUÉRÉ (C.), MYNENI (R.B.), PIAO (S.), THORNTON (P.). — Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley.* — Cambridge (United Kingdom) ; New York (NY, USA) : Cambridge University Press, 2013.
- DÉGLISE (X.). — Les conversions thermo-chimiques du bois. — *Revue forestière française*, vol. XXXIV, n° 4, 1982, pp. 249-270.
- DHÔTE (J.-F.). — A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. — *Annals of Forest Science*, vol. 53, 1996, pp. 1-20.
- FORTIN (M.), NINGRE (F.), ROBERT (N.), MOTHE (F.). — Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak in France. — *Forest Ecology and Management*, 279, 2012, pp. 176-188.
- FORTIN (M.), TREMBLAY (S.), SCHNEIDER (R.). — Evaluating a single tree-based growth model for even-aged stands against the maximum size-density relationship: Some insights from balsam fir stands in Quebec, Canada. — *The Forestry Chronicle*, 90, 2014, pp. 503-515.
- FRANÇOIS (J.). — Modélisation et évaluation environnementale des filières de cogénération par combustion et gazéification du bois. — Université de Lorraine. École doctorale Énergie - Mécanique - Matériaux, 2014 (Thèse de doctorat).
- FRANÇOIS (J.), ABDELOUAHED (L.), MAUVIEL (G.), PATISSON (F.), MIRGAUX (O.), ROGAUME (C.), ROGAUME (Y.), DUFOUR (A.). — Detailed process modeling of a wood gasification combined heat and power plant. — *Biomass and Bioenergy*, 51, 2013, pp. 68-82.
- FRANÇOIS (J.), FORTIN (M.), PATISSON (F.), DUFOUR (A.). — Assessing the fate of nutrients and carbon in the bioenergy chain through the modeling of biomass growth and conversion. — *Environmental Science and Technology*, 48, 2014, pp. 14007-14015.
- GIEC. — Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). — Edité par J. Penman *et al.* — Kanawaga (Japon) : Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2003.
- IFN. — La Forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques. — *L'IF*, n° 7, 2005.
- MANSO (R.), MORNEAU (F.), NINGRE (F.), FORTIN (M.). — Effect of climate and intra- and inter-specific competition on diameter increment in beech and oak stands. — *Forestry*, 88, 2015a, pp. 540-551.
- MANSO (R.), MORNEAU (F.), NINGRE (F.), FORTIN (M.). — Incorporating stochasticity from extreme climatic events and multi-species competition relationships into single-tree mortality models. — *Forest Ecology and Management*, 354, 2015b, pp. 243-253.
- MCKENDRY (P.). — Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. — *Bioresource Technology*, 83, 2002, pp. 37-46.
- MEDDE. — Panorama énergies-climat, édition 2014. — Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014.
- MONSERUD (R.A.), LEDERMAN (T.), STERBA (H.). — Are self-thinning constraints needed in a tree-specific mortality model?. — *Forest Science*, 50, 2004, pp. 848-858.
- PARLEMENT EUROPÉEN. — Directive 2009/28/EC. — *Journal officiel de l'Union européenne*, 2009.

- PELLETIER (C.), ROGAUME (Y.), DIECKHOFF (L.), FORTIN (M.), PONS (M.-N.), DUFOUR (A.). — Economic and environmental comparison of wood heating solutions with electricity and fossil fuels. — *Environmental Science and Technology* (soumis).
- PINGOUD (K.), PERÄLÄ (A.-L.), PUSSINEN (A.). — Carbon dynamics in wood products. — *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 6, 2001, pp. 91-111.
- SARDIN (T.). — Guide des sylvicultures – Chênaies continentales. — Office national des forêts (ONF), 2008. — 455 p.
- STAGE (A.R.). — PROGNOSIS model for stand development. — USDA Forest Service, *Research Paper INT-137*, 18 p.
- VAN VUUREN (D.P.), DEETMAN (S.), VAN VLIET (J.), VAN DEN BERG (M.), VAN RUIJVEN (B.J.), KOELBL (B.). — The role of negative CO₂ emissions for reaching 2°C – insights from integrated assessment modelling. — *Climatic Change*, 118, 2013, pp. 15-27.

LA FORÊT : STOCK DE CARBONE OU SOURCE D'ÉNERGIE ? (Résumé)

La forêt et les produits bois constituent un triple levier d'action contre le réchauffement climatique : la photosynthèse séquestre le carbone de l'atmosphère en forêt ; les produits bois récoltés prolongent le stockage du carbone durant leur durée de vie ; et ces mêmes produits bois peuvent se substituer aux carburants fossiles et aux matériaux énergivores. À des échelles régionales et nationales, le choix de privilégier certains de ces leviers d'action requiert un arbitrage. Des outils de simulation sont donc nécessaires pour évaluer l'ensemble du système, de la croissance forestière jusqu'à la production énergétique. Dans cet article, nous discutons d'avancées récentes en matière de modélisation et de couplages de modèles visant à couvrir l'ensemble de la filière forêt-bois-énergie. C'est à partir de tels couplages qu'il est possible d'évaluer le bilan environnemental de stratégies visant à maximiser le stockage de carbone en forêt, la séquestration dans les produits bois ou l'usage de biomasse forestière à des fins énergétiques. Des pistes d'amélioration, notamment en modélisation de la croissance forestière, sont évoquées.

FORESTS – CARBON STORES OR SOURCE OF ENERGY? (Abstract)

Forests and wood products can be leveraged in three ways to fight global warming: photosynthesis sequesters atmospheric carbon dioxide in forests; harvested timber prolongs carbon storage for the duration of its life cycle; these timber products can be used as a replacement for fossil fuels and energy intensive materials. On the regional and national scales, the choice of the preferred lever requires adjudication. For this purpose, simulation tools are necessary for assessing the system as a whole, from forest growth to energy production. In this article, we discuss recent advances in modelling and model coupling aimed at covering the entire forest-timber-energy chain. Coupling makes it possible to evaluate the environmental balance of strategies aimed at maximising carbon storage in forests, sequestration in timber products or the use of forest biomass for producing energy. Areas for further improvement, in particular in modelling forest growth, are identified.

