



**HAL**  
open science

# Les modèles de simulation en économie pour l'étude de la durabilité du secteur forêt-bois

Sylvain Caurla

► **To cite this version:**

Sylvain Caurla. Les modèles de simulation en économie pour l'étude de la durabilité du secteur forêt-bois. *Économie et finance quantitative [q-fin]*. Université de lorraine, 2020. tel-02990469

**HAL Id: tel-02990469**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02990469>**

Submitted on 5 Nov 2020

**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.



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

SJPEG



# Les modèles de simulation en économie pour l'étude de la durabilité du secteur forêt-bois

Dossier de demande d'inscription à l'Habilitation à Diriger les Recherches

*Sciences économiques*

Université de Lorraine

Parrain Scientifique : Serge Garcia

Jury :

Jean-Marc Blazy – Rapporteur

Thierry Brunelle – Examinateur

Olivier Damette – Examinateur

Mérim Fournier – Examinatrice

Serge Garcia – Parrain scientifique

Jean-Denis Mathias – Rapporteur

Sophie Thoyer – Rapporteur



## Remerciements

Si le texte qui suit est souvent rédigé à la première personne, le travail qui est présenté est le fruit de toute une communauté que je souhaite ici remercier.

En premier lieu, je remercie et j'associe à ce document l'ensemble de mes co-auteurs et tout particulièrement ceux qui ont subi (profité de?) mes débuts d'encadrant : j'espère vous avoir apporté quelque chose, en tous cas, moi j'ai beaucoup appris ! Merci aussi à mes collègues passés par le LEF, et ceux qui sont restés au BETA. Le texte qui suit doit beaucoup à l'environnement intellectuel stimulant et à l'ouverture d'esprit qui règnent dans ce laboratoire. Je suis extrêmement chanceux de pouvoir y poursuivre mes recherches.

L'environnement scientifique est important mais il ne fait pas tout, et les recherches que je présente ici doivent aussi beaucoup aux personnels d'appui à la recherche mais également à tous les scientifiques qui endossent les responsabilités administratives pour faire « fonctionner la machine », que ce soit au niveau du BETA ou au niveau du centre INRAE Nancy-Grand Est. Merci pour votre temps et votre soutien.

De nombreuses personnes m'ont aidé à rédiger ce document. Merci à Serge Garcia qui a accepté de parrainer cette HDR mais qui a aussi, plus généralement, su me guider et m'épauler dans ma carrière de chercheur. Merci à Marielle Brunette, Philippe Delacote, Valentin Mathieu, Claire Montagné-Huck, et Miguel Rivière pour leurs relectures attentives. Bien entendu j'endosse la responsabilité des erreurs qui subsistent.

Enfin, je remercie les membres du jury d'avoir accepté, avec enthousiasme, d'évaluer ce travail.

Nancy, le 12/07/2020



# Table des matières

<b>Partie I : Curriculum Vitae détaillé.....</b>	<b>7</b>
1. Développement des connaissances.....	8
1.1. Articles dans revues à comités de lecture.....	8
1.2. Contribution à ouvrage.....	11
1.3. Colloques de recherche.....	11
1.4. Transfert et valorisation des connaissances.....	12
2. Activités pédagogiques.....	13
2.1. Responsabilités de cours.....	13
2.2. Interventions dans modules de formation.....	13
2.3. Interventions dans la formation continue .....	14
2.4. Encadrement de doctorants.....	14
2.5. Encadrements d'étudiants.....	14
2.6. Participations à des comités de thèse.....	14
3. Administration de la recherche.....	15
3.1. Responsabilité de projet de recherche .....	15
3.2. Participation à projets de recherche :.....	15
<b>Partie II : Les modèles de simulation en économie pour l'étude de la durabilité du secteur forêt-bois .....</b>	<b>17</b>
Positionnement général de mes travaux .....	17
Introduction.....	18
1. Panorama de l'économie du secteur forêt-bois .....	19
1.1. Au fondement : le problème de l'exploitation optimale d'une ressource renouvelable .....	19
1.2. Complexification progressive des modèles de secteur forestier : un bref panorama de l'évolution des outils .....	20
1.3. Utilisation des modèles : niveau de l'action et instruments économiques .....	23
1.4. Position de mes travaux dans la littérature des modèles de secteur forestier .....	25
2. Présentation détaillée de mes travaux.....	26
2.1. Thème 1 : développements du modèle FFSM.....	26
2.2. Thème 2 : atténuation du changement climatique.....	30
2.3. Thème 3 : adaptation du secteur forestier aux changements climatiques et à ses effets indirects	35
2.4. Thème 4 : régionalisation des activités dans le secteur forestier et durabilité.....	41
2.5. « Est-il possible de développer une bioéconomie durable basée sur le secteur forêt-bois en France ? » : des réponses mais beaucoup de questions en suspens .....	47
3. Programme de recherche .....	48
3.1. Substitutions directes et indirectes des émissions de carbone par les produits bois.....	49

3.2. Modélisation du commerce international dans les FSM pour l'évaluation multi-échelle de ses impacts économiques et environnementaux .....	53
3.3. Prise en compte des synergies et arbitrages entre services écosystémiques dans les FSM : application au secteur forestier de la Guyane française .....	56
Conclusion.....	59
Bibliographie.....	60

## Partie I : Curriculum Vitae détaillé

Sylvain Caurla  
Ingénieur de Recherche 2<sup>e</sup> classe INRAE  
Né le 21/05/1985  
Tél : 03 83 39 68 96 – [sylvain.caurla@inrae.fr](mailto:sylvain.caurla@inrae.fr)  
Page personnelle : <https://sylvaincaurla.com>

### ***Diplômes***

- 2012 : Doctorat en économie, ED ABIES : Modélisation bioéconomique du secteur forestier et évaluation des impacts économiques et environnementaux des politiques climatiques sur la filière forêt-bois française, sous la direction de Franck Lecocq (CIRED).
  - Rapporteurs : Maarit Kallio (LUKE), Jean-Charles Hourcade (CIRED).
  - Examineurs : Jean-François Dhôte (ONF), Pierre-Alain Jayet (INRA).
  - Premier prix de thèse de la région Lorraine catégorie sciences humaines et sociales.
- 2009 : Doctoral Program in Management, ENPC School of International Management.
- 2008 : Ingénieur AgroParisTech (foresterie).
- 2008 : Master 2 économie du développement durable, de l'énergie et de l'environnement (EDDEE) co-habilité par AgroParisTech, l'Ecole Polytechnique, Mines ParisTech, l'Ecole des Ponts ParisTech, ENSTA ParisTech, l'EHESS et Paris-X Nanterre.

### ***Déroulement de carrière***

- Depuis 09/2012 : Ingénieur de Recherche 2<sup>e</sup> classe INRA au LEF puis au BETA, Nancy, France.
- 09/2013-10/2014 : Séjour postdoctoral au Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Allemagne.
- 10/2008-01/2012 : Doctorant au LEF, Nancy, France.

### ***Autres responsabilités***

- Depuis 2013 : Expert associé au Club Carbone Forêt Bois (I4CE), Paris, France.
- Depuis 2016 : Membre élu, conseil scientifique du département EcoSocio, INRAE.
- Depuis 2017 : Co-animateur du work package « *Forest bio-economy: actors, territories, resources and economic sectors* » du LABEX Arbre 2.
- Depuis 2019 : animateur du PRT 5.1 « *intégration territoriale* » du Labex Ressources 21
- Depuis 2019 : membre du comité de pilotage du méta-programme BETTER, INRAE.
- Rapporteur pour: *Ecological Economics, Journal of Forest Economics, Energy Policy, Journal of Forest Research, Environmental Modelling & Software, Ecological Indicators, Land Use Policy, Sustainability, Nature Scientific Reports.*

# 1. Développement des connaissances

## 1.1. Articles dans revues à comités de lecture

*Note : concernant la signature des publications, j'attache une importance particulière aux principes de légitimité, de responsabilité et d'équité. Suivant la charte de déontologie d'INRAE, mon employeur, je ne (co-)signe que les publications dans lesquelles mon rôle a été explicite dans toutes les étapes depuis la conception et la mise en œuvre des modèles et outils jusqu'à la rédaction du manuscrit final, en passant par l'analyse et l'interprétation des résultats. Dans les publications présentées dans mon dossier, l'ordre des auteurs respecte les trois règles suivantes :*

- Règle n°1 : Le premier auteur a réalisé la majorité du travail dans les trois catégories suivantes : rédaction/développement des modèles/simulations et analyses. Il peut y avoir plusieurs premiers auteurs.
- Règle n°2 : L'implication relative des auteurs dans ces trois catégories décroît avec la place dans la liste des signataires.
- Règle n°3 : Le rôle du dernier auteur est différent selon les publications. Dans [24], [23], [16], [14], [10], [3] son rôle est l'encadrement du projet de recherche et il peut, en ce sens, avoir réalisé une part importante du travail. Dans les autres publications, son implication suit la règle n°2. Je tends aujourd'hui à privilégier la première acception qui est partagée par de nombreuses disciplines scientifiques.

- [24] Rivière, M., Caurla, S. (2020) Landscape implications of managing forest for carbon sequestration, *Forestry*, DOI: 10.1093/forestry/cpaa015
- [23] Rivière, M., Caurla, S. (2020) The diversity of representations in economic models of the forest sector, *Oeconomia*, In Press.
- [22] Price, C., Sjølie, H., Caurla, S., Yousefpour, R., Meilby, H. (2020) Optimal rotations with declining discount rate: incorporating thinning revenues and crop formation costs in a cross-European comparison, *Forest Policy & Economics*, DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102218
- [21] Lenglet, J., Caurla, S. (2020) Territorialisation et écologisation dans la filière forêt-bois française : une rencontre fortuite ?, *Développement durable et territoires*, 11(1) DOI: 10.4000/developpementdurable.16645
- [20] Riviere, M., Caurla, S., Delacote, P. (2020) Evolving Integrated Models From Narrower Economic Tools: the Example of Forest Sector Models, *Environmental Modeling and Assessment*, In Press. DOI: 10.1007/s10666-020-09706-w
- [19] Caurla, S., Lobianco, A. (2020) Estimating climate service value in forestry: the case of climate information on drought for maritime pine in Southwestern France, *Climate Services*, 17. DOI: 10.1016/j.cliser.2019.100106
- [18] Fortin, M., Pichancourt, J-B., Melo, L., Colin, A., Caurla, S. (2019) The effect of stumpage prices on large-area forest growth forecasts based on socio-ecological models, *Forestry*, 92: 339-356.
- [17] Petucco, C., Lobianco, A., Caurla, S. (2020) Economic evaluation of an invasive forest pathogen at a large scale: the case of ash dieback in France, *Environmental Modeling and Assessment*, In Press, accepted paper. DOI: 10.1007/s10666-019-09661-1
- [16] Beaussier, T., Caurla, S., Bellon-Maurel, V., Loiseau, E. (2019) Coupling economic models and environmental assessment methods to support regional policies: A critical review, *Journal of Cleaner Production*, 216: 408-421.
- [15] Caurla, S., Bertrand, V., Le Cadre, E., Delacote, P. (2018) Heat or power: how to increase the use of energy wood at the lowest costs? *Energy Economics*, 75: 85-103.

- [14] Lenglet, J., Courtonne, J-Y., Caurla, S. (2017) Material flow analysis of the forest-wood supply chain: A consequential approach for log export policies in France. *Journal of Cleaner Production*, 165: 1296-1305.
- [13] Brunette, M., Caurla, S. (2016) An Economic Comparison of Risk Handling Measures against *Hylobius abietis* and *Heterobasidion annosum* in the Landes de Gascogne Forest. *Annals of Forest Science*, 73: 777–787.
- [12] Lobianco, A., Caurla S., Delacote P., Barkaoui, A. (2016) Carbon mitigation potential of the French forest sector under threat of combined physical and market impacts due to climate change, *Journal of Forest Economics*, 23: 4-26.
- [11] Lobianco, A., Delacote P., Caurla 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.
- [10] Lenglet, J., Courtonne, J-Y., Caurla, S. (2016) Évaluation et représentation des flux de bois dans la filière. *Revue Forestière Française*, 68(2): 193-195.
- [9] Caurla, S., Garcia, S., Niedzwiedz, A. (2015) Store or export? An economic evaluation of financial compensation to forest sector after windstorm. The case of Hurricane Klaus. *Forest Policy and Economics*, 61: 30-38.
- [8] Lobianco, A., Delacote P., Caurla S., Barkaoui, A. (2015) The importance of introducing spatial heterogeneity in bio-economic forest models: Insights gleaned from FFSM++, *Ecological Modelling*, 309–310: 82-92.
- [7] Caurla, S. (2014) Le modèle FFSM 1.0: de l’outil de recherche en économie à son utilisation pour l’aide à la décision, *Revue Forestière Française*, 66(3): 313-324.
- [6] Caurla, S. (2013) Une typologie et une histoire des modèles économiques de secteur forestier, *Revue Forestière Française*, 65(2):163-182.
- [5] Caurla, S., Delacote, P., Lecocq, F., Barthes, J., Barkaoui, A. (2013) Combining an inter-sectoral carbon tax with sectoral mitigation policies: Impacts on the French forest sector”. *Journal of Forest Economics*, 19(4): 450-461.
- [4] Caurla, S., Lecocq, F., Delacote, P., Barkaoui, A. (2013) Stimulating fuelwood consumption through public policies: An assessment of economic and resource impacts based on the French Forest Sector Model, *Energy Policy*, 63: 338-347.
- [3] Wernsdörfer, H., Colin, A., Bontemps, J-D., Chevalier, H., Pignard, J., Caurla, S., Leban, J-M., Hervé, J-C., Fournier, M. (2012) Large scale dynamics of a heterogeneous forest resource are jointly driven by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure, *Annals of Forest Science*, 69(7): 829-844
- [2] Lecocq F., Caurla S., Delacote P., Barkaoui A., Sauquet A. (2011) Paying for forest carbon or stimulating fuelwood demand? Insights from the French Forest Sector Model, *Journal of Forest Economics*, 17(2), 157-168.
- [1] Sauquet, A., Lecocq, F., Delacote, P., Caurla, S., Garcia, S., Barkaoui, A. (2010) Estimating Armington Elasticities for Sawnwood and Application to the French Forest Sector Model, *Energy and Resource Economics*, 33(4): 771-781.

Numéro de la publication	Nombre d'auteurs	Rôle de premier auteur	Rôle d'encadrement du premier auteur	Contribution à la rédaction	Contribution au développement des outils et des bases de données	Contribution aux simulations et à l'analyse des résultats
[24]	2		✓	20%	30%	30%
[23]	2		✓	30%	30%	40%
[22]	5			15%	25%	10%
[21]	2			40%	30%	40%
[20]	3		✓	15%	20%	25%
[19]	2	✓		95%	90%	90%
[18]	5			15%	10%	15%
[17]	3			20%	30%	15%
[16]	4		✓	30%	15%	20%
[15]	4	✓		60%	50%	60%
[14]	3		✓	30%	25%	30%
[13]	2	✓		50%	50%	50%
[12]	4			25%	30%	30%
[11]	4			20%	20%	25%
[10]	3		✓	50%	25%	30%
[9]	3	✓		90%	80%	95%
[8]	4			15%	20%	15%
[7]	1	✓		100%	100%	100%
[6]	1	✓		100%	100%	100%
[5]	5	✓		80%	60%	80%
[4]	4	✓		80%	80%	80%
[3]	9			5%	10%	5%
[2]	5	✓		40%	60%	40%
[1]	6			5%	10%	10%

Figure 1: Tableau récapitulatif de ma contribution relative au sein des publications (co-)signées et présentées en section 1.1. Par exemple, une contribution de 50% signifie que j'ai supporté 50% de la charge de travail nécessaire au résultat final. L'estimation tient compte à la fois du temps qui a été consacré et de l'impact réel sur le résultat final lié à l'investissement scientifique qu'il soit méthodologique, théorique, numérique, etc. Par ailleurs, plus le nombre d'auteurs augmente, plus la contribution individuelle est supposée diminuer, par exemple une contribution de 30% peut être considérée comme majeure pour un article qui compte 4 auteurs et mineure pour un article qui en compte 2.

## 1.2. Contribution à ouvrage

[A] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO (2016). *Forestry for a low-carbon future: integrating forests and wood products in climate change strategies*. ISBN 978-92-5-109312-2.

## 1.3. Colloques de recherche

[B] *Estimating climate service value in forestry: the case of climate information on drought for maritime pine in Southwestern France*. World Conference of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 1-6 octobre 2019 ; Curitiba, Brésil.

[C] *From early attempts to recent trends: economic simulation as an investigation tool for the forest sector*. World Conference of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 1-6 octobre 2019 ; Curitiba, Brésil.

[D] *Drivers and leeways behind the French Forest Sector*. Conference of the IUFRO, 18 septembre 2017; Nancy, France.

[E] *Material flow analysis of the forest-wood supply chain: a consequential approach for logs exports policies in France*. Conference of the French Association of Environmental and Resource Economists (FAERE), 8 septembre 2016; Bordeaux, France.

[F] *Store or export? An economic evaluation of financial compensation to forest sector after windstorm. The case of Hurricane Klaus :*

- a. Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE), 24-27 juin 2015; Helsinki, Finlande.
- b. Conference of the Scandinavian Society of Forest Economics (SSFE), 21-23 mai 2014; Uppsala, Suède.

[G] *Stimulating fuelwood consumption through public policies: an assessment of economic and resource impacts based on the French Forest Sector Model*, Conference of the EAERE, 26-29 juin 2013; Toulouse, France.

[H] *Combination of a carbon tax and direct mitigation policies: potential impacts on the forest sector:*

- a. Workshop biennal du Laboratoire d'Economie Forestière; 30 mai 2012; Nancy, France.
- b. Conférence internationale du GIP EcoFor "Tackling climate change: the contribution of forest scientific knowledge", 22 mai 2012; Tours, France.

[I] *Retributing carbon in situ or subsidizing biomass energy? Insights on the French forest sector :*

- a. IUFRO World Congress, 23-28 août 2010, Séoul, Corée du Sud.
- b. International Energy Workshop (IEW), 21-23 juin 2010 ; Stockholm, Suède.

[J] *The French Forest Sector Model: a bio-economic tool to assess climate policies impacts on the forest sector*. World Forest Congress, 18-23 octobre 2009 ; Buenos Aires, Argentine.

[K] *Fuelwood consumption, restrictions about resource availability and public policies: impacts on the French forest sector*. International Energy Workshop (IEW), 17-19 juin 2009 ; Venise, Italie.

## 1.4. Transfert et valorisation des connaissances

### *Rapports d'expertises*

- [L] Roux, A., Dhôte, J.-F. (Coordinateurs), Achat, D., Bastick, C., Colin, A., Bailly, A., Bastien, J.-C., Berthelot, A., Bréda, N., Caurla, S., Carnus, J.-M., Gardiner, B., Jactel, H., Leban, J.-M., Lobianco, A., Loustau, D., Meredieu, C., Marçais, B., Martel, S., Moisy, C., Pâques, L., Picart-Deshors, D., Rigolot, E., Saint-André, L., Schmitt, B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).
- [M] Lenglet, J., Courtonne, J.-Y., Caurla, S. (2015) Evaluation et analyse des flux de bois dans le Grand Est. Convention d'étude n°2015-01 entre la Direction régionale de l'agriculture, de l'alimentation et la forêt de Lorraine (DRAAF, commanditaire de l'étude) et AgroParisTech portant sur la réalisation d'une étude sur les flux de bois dans l'inter-région Nord-Est.
- [N] Caurla S., Garcia S., Montagné-Huck C., Niedzwiedz A. (2013). Étude du volet « mobilisation » du plan de solidarité nationale faisant suite aux dommages causés aux forêts par le passage de la tempête Klaus du 24 janvier 2009. Rapport scientifique du Laboratoire d'Economie Forestière en application du marché DGPAAT 2012-098. Septembre 2013. 52p.

### *Articles de transfert*

- [O] Caurla, S., Montagné-Huck, C. (2017) Quels outils économiques pour analyser les innovations bioéconomiques dans les filières forêt-bois à l'échelle du territoire ? *Innovations Agronomiques*, 56: 59-70
- [P] Caurla, S., Delacote, P. (2014) Taking forestry issues into account in the fight against climate change: lessons from French Forest Sector Modeling. *Policy Brief* 2014-04, Chaire économie du climat.
- [Q] Caurla, S., Delacote, P. (2014). Climate Change Mitigation in Temperate Forests: The Case of The French Forest Sector. *Information et débats* 2014-35, Chaire économie du climat.
- [R] Caurla, S., Delacote, P. (2012). FFSM: un modèle de la filière forêts-bois française qui prend en compte les enjeux forestiers dans la lutte contre le changement climatique, *INRA Sciences Sociales* 4/2012.

### *Présentations orales de vulgarisation et séminaires de transfert*

- [S] La substitution carbone par le bois comme mesure d'atténuation : fronts de sciences et questions en suspens. 8e journées scientifiques du GDR Sciences du Bois; 20 novembre 2019; Épinal.
- [T] Combining partial equilibrium modelling and LCA to assess the regional eco-efficiency of an economic incentive: an application to a fuelwood subsidy in Grand-Est region. Ateliers du projet H2020 SIM4NEXUS; 15 novembre 2019; Kehl.
- [U] La substitution carbone par le bois-énergie comme mesure d'atténuation : fronts de sciences et questions en suspens. Matinées de la transition énergétique dans le pôle métropolitain Nord Franche-Comté 2019-3; 7 novembre 2019; Belfort.
- [V] Animation du brunch Université de Lorraine et AgroParisTech « les données spatiales en forêt », 19 octobre 2017 ; Nancy.

- [W] « *Quels outils économiques pour analyser les innovations bioéconomiques dans les filières forêt-bois à l'échelle du territoire ?* » Carrefour d'innovations agronomiques de l'INRA, 8 décembre 2016 ; Nancy.
- [X] « *Les méthodes d'évaluation en économie de l'environnement* ». Réunion du club carbone forêt-bois; 1 décembre 2016; Paris.
- [Y] « *Bois-énergie: économie et controverses* » Conférence « *Et si la forêt était notre pétrole* » organisée par l'association « *La vigie de l'eau* »; 30 mai 2016; Saint-Dié-Des-Vosges.
- [Z] « *Forêt, bois-énergie et modélisation économique: les résultats du Laboratoire d'Economie Forestière* ». Séminaire organisé dans le cadre de la restitution du projet *Forêver* « *Forêt et bois-énergie: une solution pour réduire le réchauffement climatique* »; 2 décembre 2016; Paris.
- [AA] « *FFSM: un outil de projection de la filière forêt-bois* ». Séminaire interne Ministère de l'écologie et du développement durable; 10 février 2015; Paris.
- [BB] « *Linking bioeconomy, forest management and climate mitigation: insights from MAGPIE model and perspectives* ». French-German Bilateral Symposium; 7 mai 2014; Berlin.
- [CC] « *Les thématiques bois-énergie au LEF* ». Réunion du club carbone forêt-bois; 19 novembre 2014; Paris.
- [DD] « *Modélisation de la filière forêt-bois française. Evaluation des impacts des politiques climatiques* ». Friday Lunch Meeting, Chaire Economie du Climat; 15 juin 2012; Paris.
- [EE] « *From international perspectives to national policies* », UN-FAO conference on forestry, 8 décembre 2011; Paris.

## 2. Activités pédagogiques

### 2.1. Responsabilités de cours

- *Economie du Carbone Forestier* (24h cours + 6h TD ; 2015-2020), AgroParisTech (domaine d'approfondissement RFF : ressources forestières et filière bois) et Master AETPF (Agrosciences, environnement, territoires, paysage, forêt) Parcours BFD (Bois, Forêt et Développement Durable).
- *Evaluation et protection de l'environnement* (18h cours ; 2017-2020), Université de Lorraine : Master d'économie pour les ingénieurs en double cursus (ETEEN).
- *Stratégies et politiques de développement durable* (12h cours ; 2019-2020), Université de Lorraine : Master d'économie pour les ingénieurs en double cursus (ETEEN).

### 2.2. Interventions dans modules de formation

- *Economie de l'environnement* (5h cours + 5h TD ; 2012-2018), Master « Sols, Eau, Environnement » Université de Lorraine.
- *Economie du carbone forestier* (3h cours, 2012-2018), Master Economie du Développement Durable de l'Energie et de l'Environnement (EDDEE), AgroParisTech, Ecole Polytechnique, Mines ParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, ENSTA ParisTech, EHESS, Paris-X Nanterre.
- *Macroéconomie* (20 h TD, 2012), École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires (ENSAIA).

### 2.3. Interventions dans la formation continue

- *Economie de l'environnement* (24h cours ; 2012), formation EDUTER à destination des personnels du Ministère de l'Agriculture.
- *Calcul Economique ; Critères de gestion forestière ; Estimation forestière* (10h cours, 10h TD ; 2010, 2011), INFOMA (formation techniciens du Ministère de l'Agriculture).

### 2.4. Encadrement de doctorants

- Thomas Beaussier, 2016-présent: *Assessing the impacts of prospective scenarii in territorial Life Cycle Analysis. Application to a forest territory*. Ecole doctorale : SJPEG ; discipline : économie ; direction de thèse : Véronique Bellon-Maurel et Philippe Delacote ; co-encadrante : Eléonore Loiseau.
- Miguel Rivière, 2017-présent : *How to combine wood production and ecosystemic services in forest? Assessment of the environmental and economic impacts on the French forest sector*. Ecole doctorale : ABIES, discipline : sciences de l'environnement ; direction de thèse : Philippe Delacote.

### 2.5. Encadrements d'étudiants

- Valentin Mathieu, 2019 (Master 2 ETEEN, Université de Lorraine et 3<sup>ème</sup> année AgroParisTech, stage de fin d'étude) : *Analyse critique des modèles de flux commerciaux de bois sous l'angle des notions de lieu, d'espace et d'échelle*.
- Guillaume Salzet, 2018 (Master 2 ETEEN, Université de Lorraine) : *Analyse spatiale des clusters industriels dans le secteur forêt-bois français et leur impact sur la probabilité de coupe*.
- Jemma Lemarchand, 2017 (Master 2 Analyse Economique et Développement International, Université de Clermont-Auvergne) : *Climate services valuation in forest and agriculture*.
- Guillaume Hellot, 2016 (3<sup>ème</sup> année ingénieur AgroParisTech, stage de fin d'étude): *Résilience de la filière forêt bois dans le PNR des Ballons des Vosges*.
- Loïc Kawalec, 2016 (Master 2 Ingénierie et gestion des projets environnementaux, Université Paul Valéry Montpellier 3) : *Développement d'un modèle pour l'évaluation des impacts environnementaux et économiques de scénarios prospectifs dans le secteur forestier*.
- Jonathan Lenglet, 2015 (3<sup>ème</sup> année AgroParisTech, stage de fin d'étude): *Evaluation des flux de bois dans la région Grand Est*.
- Alexandre Gourdy, 2012 (2<sup>ème</sup> année AgroParisTech) : *Risques pathogènes en forêt*.

### 2.6. Participations à des comités de thèse

- Rémi Demol, 2018-présent: *Hydrogen Production from Biomass and Waste Gasification, Techno-Economic Assessment of Innovative Solutions* (Discipline : Chimie ; Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie des Molécules, Procédés, Produits et Energie, Université de Lorraine).
- Ghenima Amer, 2017-présent: *Assessing the conditions for securing the wood biomass supply of a bioalcohol unit* (Discipline : Economie ; Ecole Doctorale : Sciences économiques, juridiques, politiques et de gestion, Université Clermont-Auvergne).

- Jonathan Lenglet, 2016-présent: *Les territoires de la filière forêt-bois. Recompositions et adaptations d'un secteur en changement* (Discipline : Géographie ; Ecole Doctorale de Géographie de Paris 1).

### 3. Administration de la recherche

#### 3.1. Responsabilité de projet de recherche

- AFFORBALL (Programme PSDR4, 2015-2020, budget géré : 200 k€).

#### 3.2. Participation à projets de recherche :

- AF filières (Programme Graine de l'ADEME, 2016-2019, budget géré : 9k€). Coordinateur : J.Y. Courtonne, INRIA.
- ExtraForEst (Financement Labex Arbre et MAAF, 2017-2020, budget géré : 3k€). Coordinateur : F. Colin, INRAE.
- MARCO (Programme H2020, 2016-2018, budget géré : 25k€). Coordinateur : Climate-KIC.
- Hy-C-Green (Financements du fond régional de coopération pour la recherche et région Lorraine, 2017-2021, budget géré : 60 k€). Coordinateur : A. Dufour, CNRS.
- Gemm-Est (Financement Lorraine Université d'Excellence, 2019-2021, budget géré : 3k€). Coordinateur : F. Colin, INRAE.
- Mobinter (Programme Graine de l'ADEME, 2020-2023, budget géré : 30 k€). Coordinateur : M. Tivadar.
- Bio-Sylve (Programme Graine de l'ADEME, 2020-2023, budget géré : 35 k€). Coordinateur : Denis Loustau.
- « Des Hommes et des Arbres » (Programme Territoires d'Innovation, PIA3, 2019-2022, budget géré : 88 k€). Coordinateur : métropole du Grand Nancy.



## **Partie II : Les modèles de simulation en économie pour l'étude de la durabilité du secteur forêt-bois**

### **Positionnement général de mes travaux**

Depuis ma thèse, soutenue en 2012, mes travaux de recherche sont consacrés à l'économie du secteur forêt-bois. Je m'intéresse en particulier aux impacts des changements globaux sur ce secteur, aux instruments pour développer certains segments, en particulier la biomasse pour l'énergie, et aux représentations des acteurs économiques (gestionnaires forestiers, industriels, etc.).

La majorité de mes travaux aborde ces questions à l'aide de modèles de simulation appelés « modèles de secteur forestier ». Ces modèles associent des représentations théoriques des comportements, la calibration empirique et la puissance numérique. Ils combinent la modélisation économique, la dynamique des ressources forestières et la représentation des flux et stocks biophysiques dans le secteur. En ceci, ma recherche se rattache au domaine de l'économie appliquée et de la simulation économique. Les articles qui en sont issus sont publiés pour partie dans des journaux d'économie (*Energy Economics, Energy Policy, Journal of Forest Economics, Forest Policy and Economics, Resource and Energy Economics*), et pour partie dans des revues interdisciplinaires environnementales ou forestières (*Journal of Cleaner Production, Forestry, Environmental Modeling and Assessment, Annals of Forest Science, Ecological Modelling, Développement Durable et Territoires*). Ce lien avec d'autres disciplines me semble nécessaire pour répondre à des enjeux économiques pour lesquels les mécanismes biophysiques jouent un rôle central.

Enfin, l'échelle de mes travaux est essentiellement la France métropolitaine et ses régions, parfois les territoires. Le mémoire qui suit est implicitement, sauf mention particulière, construit en référence à ces échelles.

*NB1 : dans la partie « bilan » de ce mémoire, j'ai fait le choix de ne présenter en détail que les recherches menées depuis la fin de ma thèse. J'évoque rapidement mes travaux de thèse quand cela est nécessaire et je renvoie le lecteur à mon manuscrit de thèse pour un approfondissement.*

*NB2 : les graphiques et tableaux issus de mes publications n'ont pas tous été traduits en français. Je prie le lecteur de m'excuser pour la rupture de style que cela engendre.*

## Introduction

La définition du secteur forêt-bois n'est pas aisée. Solberg (1986) définit le secteur forestier comme composé de la sylviculture, des industries forestières et des interactions entre ces deux activités. Dans la même veine, Buongiorno (2015) le définit comme l'ensemble de toutes les activités liées à la sylviculture, à la récolte du bois en forêt, au transport, à la transformation de ce bois dans les industries forestières et à l'utilisation des produits qui en résultent en aval. Néanmoins, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) rappelle qu'il n'existe pas de définition universellement acceptée du secteur forestier et précise que « le secteur englobe toutes les activités économiques qui dépendent essentiellement de la production de biens et de services provenant des forêts » (FAO, 2004). Cette approche, plus large que les deux précédentes, inclut ainsi à la fois les activités de production, de récolte, de transformation et de commercialisation des produits ligneux et non ligneux mais également la fourniture de services écosystémiques de régulation (*e.g.* lutte contre l'érosion, stockage de carbone), de support (*e.g.* habitats forestiers) et culturels (*e.g.* récréation).

En France, le terme plus spécifique de « filière » est utilisé depuis les années 1970, d'abord sous l'impulsion de l'école française d'économie industrielle, avant d'être repris dans le secteur forestier (Guillon, 1974). « La filière désigne couramment l'ensemble des activités complémentaires qui concourent, d'amont en aval, à la réalisation d'un produit fini. La filière intègre en général plusieurs branches » (INSEE, 2020), lesquelles regroupent quant à elles des unités de production homogènes. Selon Sekkat (1987), la notion de filière combine la succession d'opérations qui concourent à l'utilisation d'une ressource avec les relations techniques, économiques et sociales entre les différents acteurs impliqués. Conçue historiquement comme un outil d'analyse et de représentation pour la compréhension des systèmes, la notion de filière s'est vue incorporée dans le champ des politiques publiques lesquelles, en France, ont tenté d'en faire un outil opérationnel, alimentant parfois une confusion entre sa portée descriptive et prescriptive. Son caractère relativement flou pose en permanence la question de la pertinence de son utilisation, c'est pourquoi je lui préfère le terme de « secteur » qui permet, en outre, de rendre compte des productions forestières autres que le bois.

Quelles que soient la définition et la dénomination retenues, la désagrégation du secteur forestier en un segment « amont » (foresterie et services produits par la forêt) et un segment « aval » (industries) est commune. Une conséquence est que le secteur forestier doit faire face à des enjeux multiples et parfois contradictoires, impliquant des processus intégrés à la fois « horizontalement » et « verticalement » qui incluent les dynamiques naturelles et les activités économiques (Johnston et van Kooten, 2014).

Parmi les enjeux, celui de la durabilité de l'économie du secteur forêt-bois, s'il est souvent mis en avant dans les discours, est probablement le plus complexe à analyser. D'un côté, en fournissant du bois, le secteur forestier se situe aujourd'hui au cœur de la stratégie nationale pour le développement de la bioéconomie définie comme « l'économie de la photosynthèse et plus largement du vivant »<sup>1</sup>. La position centrale de la biomasse dans cette stratégie est en grande partie due à son abondance sur le territoire métropolitain<sup>2</sup>. D'un autre côté, les écosystèmes forestiers qui fournissent le bois pour cette bioéconomie sont, d'une part, sollicités pour la production d'autres biens et services susceptibles d'entrer en concurrence avec la production de bois et, d'autre part, déjà impactés par les changements climatiques, avec des répercussions sensibles sur leur fonctionnement et la production, *in fine*, de ces biens et services.

---

<sup>1</sup> Elle englobe « l'ensemble des activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation de bio-ressources [matières d'origine biologique non fossilisées] destinées à répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins matériels et énergétiques de la société, et à lui fournir des services écosystémiques » (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018).

<sup>2</sup> Seulement la moitié de la production biologique des forêts françaises, c'est-à-dire la biomasse produite par les écosystèmes forestiers chaque année, est actuellement valorisée dans le secteur forestier, ce qui démontre le fort potentiel de développement de ce secteur (Houpert et Botrel 2015).

Mes travaux s'inscrivent dans ce contexte et cherchent à analyser quelles sont les conditions pour le déploiement d'une bioéconomie durable basée sur le secteur forêt-bois en France. Par « bioéconomie durable basée sur le secteur forêt-bois », j'entends la production, la transformation, l'utilisation et la gestion de la fin de vie des produits bois en substitution aux produits d'origine fossile et/ou fortement émetteurs de gaz à effet de serre, tout en préservant les ressources naturelles, la biodiversité et en tenant compte de la production des autres biens et services écosystémiques forestiers. Pour répondre à cette problématique, je m'appuie sur des modèles sectoriels appelés « modèles de secteur forestier » (ou FSM, pour Forest Sector Model dans le reste du texte) et, en particulier, le modèle FFSM (« French Forest Sector Model ») dont j'ai développé la première version pendant ma thèse et dont j'encadre les développements depuis.

Le présent mémoire est organisé comme suit. La section 1 dresse un panorama de l'économie du secteur forestier et positionne mes travaux dans ce paysage. Dans la section 2, je présente le bilan de mes recherches passées, que j'organise selon quatre thèmes. La section 3 présente enfin mes perspectives de recherche. Tout au long du développement de ce mémoire, je fais référence à mes publications en utilisant les mêmes numéros que dans mon CV détaillé (partie I).

## 1. Panorama de l'économie du secteur forêt-bois

Dans cette section, je propose dans un premier temps une brève revue de la littérature de l'économie du secteur forêt-bois. Cette revue me permet d'expliquer les raisons du développement et de la pérennité des FSM pour l'étude du secteur forestier en détaillant plusieurs caractéristiques essentielles de ce secteur. Pour cela je m'appuie largement sur deux revues de littérature que j'ai publiées récemment avec Miguel Rivière dont j'assure le co-encadrement de thèse ([20] Rivière, Caurla, et Delacote, 2020; [23] Rivière et Caurla, 2020a). A la fin de cette section, je situe ma recherche dans ce panorama. Je ne détaille volontairement pas ma recherche dans cette section, dont le but est essentiellement de donner un aperçu du champ dans lequel mes travaux s'inscrivent.

### 1.1. Au fondement : le problème de l'exploitation optimale d'une ressource renouvelable

L'économie du secteur forestier s'est longtemps cantonnée à la question de l'exploitation de la ressource bois. Depuis le papier séminal d'Hotelling (1931), la littérature économique sur l'exploitation des ressources naturelles envisage ces dernières en terme de stocks à exploiter rationnellement ce qui revient, pour l'agent économique, à choisir le taux optimal d'extraction. Les économistes considèrent les ressources renouvelables comme un cas particulier de ce problème, le calcul du taux optimal d'extraction étant rendu plus difficile par l'existence d'un renouvellement (Pearce et Warford, 1993).

Pourtant le problème de l'exploitation optimale des ressources forestières s'est historiquement posé bien avant les travaux de Hotelling. Martin Faustmann formule ainsi, dès 1849, le problème de la maximisation des bénéfices tirés des forêts pour une séquence infinie de révolutions identiques<sup>3</sup>. La condition qui en découle dite « condition d'exploitation optimale » stipule qu'un peuplement est exploité à l'optimum *si le revenu supplémentaire tiré de l'attente est tout juste compensé par la perte des intérêts qui auraient pu être tirés, sur la même période, du produit de la liquidation du peuplement et de la vente de la terre nue*. Autrement dit, la condition stipule que l'exploitation doit intervenir au moment où les bénéfices marginaux tirés de la vente de bois dépassent les bénéfices marginaux tirés de l'attente d'une année supplémentaire (Peyron et Maheut, 1999).

---

<sup>3</sup> Je reviens sur l'histoire du concept dans ma thèse (Caurla, 2012; p.86).

Contrairement aux travaux qui ont suivi l'article de Hotelling qui se revendiquent « des ressources naturelles », la problématique de Faustmann n'était pas tant d'optimiser la récolte pour ne pas appauvrir la ressource globale mais plutôt d'optimiser la gestion, c'est à dire le compromis entre coûts et revenus, sur une infinité de périodes. Pour comprendre l'apparition précoce de ces questions qui ont conduit à définir un « âge optimal d'exploitabilité » il faut considérer le contexte économique de l'époque : en plein essor industriel, le bois était une ressource majeure et abondante pour la construction et la production d'énergie. L'enjeu, dans ce contexte, était de transformer des taillis surexploités pour la production de bois de chauffe en système forestier plus productif permettant d'augmenter le revenu engendré par la forêt et de diversifier l'offre de produits. Il s'agissait d'une approche résolument normative de recherche d'un critère permettant d'optimiser les revenus tirés de la forêt.

## 1.2. Complexification progressive des modèles de secteur forestier : un bref panorama de l'évolution des outils

Si la condition de Faustmann peut aujourd'hui paraître simpliste à l'économiste de l'environnement et des ressources naturelles, il faut la comprendre à travers son époque. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, la ressource forestière était considérée comme abondante et la question de son épuisement ne se posait pas ; de même les concepts d'aménités et de « services écosystémiques » rendus par les écosystèmes forestiers n'existaient pas. La forêt n'était perçue qu'à travers le stock de bois qu'elle contenait, et l'homme était le principal responsable de l'évolution de ce stock à travers ses décisions de gestion. Les changements climatiques et ses conséquences indirectes comme l'invasion de pathogènes avaient un impact anecdotique sur la production. Enfin, si le commerce international existait, il était bien moins développé qu'aujourd'hui et, en majorité, les bois étaient transformés et consommés localement.

Cent soixante-dix ans plus tard, le secteur forestier a radicalement changé et, si l'épuisement de la ressource n'est actuellement pas un risque en France métropolitaine, la production de services écosystémiques, l'adaptation des forêts aux changements globaux et le commerce international sont aujourd'hui des enjeux essentiels pour le secteur. Afin d'y répondre, une part importante de la littérature actuelle utilise des FSM. Le modèle « French Forest Sector Model » (FFSM) sur lequel s'appuie une grande partie de mes travaux s'inscrit dans cette catégorie. Dans leur version « de base », les FSM sont des modèles représentant le secteur forestier à travers un modèle économique en équilibre partiel permettant de déterminer les prix des produits, les quantités de l'offre et de la demande. Ces modèles sont résolus numériquement sur ordinateur en raison de leur taille et de la quantité de données nécessaire au calcul de l'équilibre. Les premiers FSM ont été développés pour réaliser des études prospectives dans les années 1970 et, au fil du temps, d'autres modèles ont été utilisés pour traiter des questions liées au changement climatique, à la production d'énergie et à la protection de l'environnement. Avant d'en venir à leur utilisation dans mes travaux, je détaille, dans la suite de cette sous-section, comment la perception des enjeux économiques et environnementaux a étoffé le programme de recherche de l'économiste modélisateur du secteur forestier au cours du XX<sup>ème</sup> siècle et a conduit au développement de FSM de plus en plus complexes et performants.

### ***Prise en compte de l'aval de la filière : vers des modèles d'équilibre économique***

Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, il n'existait pas de réel besoin de modéliser la formation des prix des bois en tenant compte à la fois de l'amont et de l'aval de la filière. L'hypothèse de prix fixe était considérée comme acceptable dans un monde où le prix du bois ne subissait pas de variations majeures. Aux Etats-Unis, cela s'est traduit par l'utilisation de modèles dits de *gap analysis* où la demande et l'offre étaient projetées séparément par extrapolation des tendances passées. Il s'agissait plus exactement « d'estimations des volumes futurs de l'offre et de la demande à un prix autre que le prix d'équilibre » (Adams et Haynes, 2007).

Ces méthodes ont commencé à montrer leurs limites suite à la raréfaction des ressources consécutivement à leur utilisation pour la Seconde Guerre mondiale puis lorsque les prix des matières premières, bois compris, sont devenus volatils dans les années 1970. Pour pallier ces limites, la recherche a été orientée vers le développement de modèles de prix d'équilibre spatial, d'abord aux Etats-Unis sous l'impulsion du Service Forestier Américain (Adams et Haynes, 2007). Peu de temps après, un deuxième groupe de recherche s'est développé en Europe à l'institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA - Autriche) (Dahan, 2007) et a conduit à l'élaboration du projet *Global Forest Sector* à la fin des années 1970 dans le but d'étudier l'évolution à long terme de la production, de la consommation et du commerce mondial des produits forestiers. C'est au sein de ce projet que le premier modèle de secteur forestier mondial avec formation endogène des prix a été développé dans les années 1980 (Kallio et al., 1987).

### ***Prise en compte de l'espace : vers des FSM spatiaux et multi-échelles***

La forêt représente une utilisation majeure des terres dans de nombreuses régions du monde, comme la France métropolitaine qui est recouverte à 30% de forêts<sup>4</sup>. A l'échelle des territoires, les écosystèmes forestiers structurent les paysages et sont le support d'une activité économique importante et localisée, pour grande partie, en milieu rural. En France, le secteur du bois génère ainsi environ 440 000 emplois directs et indirects, c'est-à-dire incluant le travail du bois et sa mise en œuvre au travers d'industries variées (travail du bois, ameublement, construction). Parallèlement, ce secteur est très intensif en transport : l'industrie du bois est mondialisée et ses produits font l'objet d'un commerce international très dynamique (Li, Mei, et Linhares-Juvenal, 2019). Il s'agit donc, par nature, d'un secteur multi-échelles. De même, si, en raison de son importance au regard des défis environnementaux, la forêt est au cœur des discussions dans les instances internationales comme le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ou la plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), la politique forestière est souvent décidée et mise en œuvre au niveau national voire régional, certains pays ayant mis en place une gouvernance décentralisée (Sergent, Arts, et Edwards, 2018). Le secteur forestier se trouve donc à la croisée des chemins entre les échelles mondiale, nationale et locale et l'espace apparaît dès lors comme un paramètre central du problème de l'allocation des ressources du secteur forêt-bois.

L'importance de ce paramètre se retrouve dans le fondement même des premiers FSM qui trouvent leur origine dans les travaux de Koopmans et Dantzig sur les systèmes de transport, l'analyse d'activités et la programmation linéaire au sein de la « Cowles Commission » (Dantzig, 1950; Koopmans, 1949; Caurla, 2012). C'est à la suite d'une conférence à la Cowles Commission en 1949 intitulée « l'analyse de la production et de l'allocation par activité » que Samuelson (1952) a proposé une solution au problème du prix d'équilibre spatial (Malinvaud, 1954). Pour résoudre ce problème, le surplus social net de deux économies séparées géographiquement est maximisé sous un ensemble de contraintes, dont le coût de transport des commodités d'un lieu à un autre. Cette théorie, pierre angulaire de la plupart des FSM aujourd'hui utilisés, a ensuite donné lieu à des solutions à l'aide de méthodes basées sur la programmation quadratique ou les approximations linéaires (*e.g.* Takayama et Judge, 1964). Cette dimension spatiale est au cœur de plusieurs de mes travaux et de mes perspectives de recherches, le modèle FFSM étant développé à l'échelle des régions françaises en tenant compte explicitement du transport entre régions selon la théorie de Samuelson (1952) et des échanges avec le reste du monde selon la théorie d'Armington (1969). J'y reviens dans les sections 2 et 3.

### ***Prise en compte du temps long : vers de nouvelles problématiques d'adaptation***

Outre l'espace, le secteur forêt-bois entretient une relation particulière avec une autre dimension : le temps. En amont du secteur, les décisions de gestion sont prises sur des horizons temporels particulièrement longs. Par exemple, la durée de rotation d'une futaie régulière de chênes est de l'ordre

---

<sup>4</sup> Cette proportion monte à 96% pour la Guyane française, quasiment exclusivement recouverte de forêts.

de 160 à 200 ans en France (Delpech, Dumé, et Galmiche, 1985). Une conséquence importante est que les acteurs économiques qui prennent les décisions ne sont généralement pas ceux qui en récoltent les fruits et les choix sont souvent effectués dans une optique de transmission aux générations suivantes (e.g. Bengston, Asah, et Butler, 2011; Ficko et al., 2019). Ainsi, les notions de transmission, d'équité intergénérationnelle ou encore de prospective ont largement façonné la nature des approches pour l'étude économique du secteur forêt-bois. L'importance du temps se retrouve dans la structure même des FSM et la plupart d'entre eux sont des modèles dynamiques que l'on peut séparer en deux groupes (Latta, Sjølie, et Solberg, 2013) : les modèles intertemporels résolvent tous les équilibres simultanément et supposent que les agents économiques ont une anticipation parfaite des conditions futures (e.g. Sohngen, Mendelsohn, et Sedjo, 1999) tandis que les modèles récursifs résolvent les équilibres année après année, en supposant que les agents sont myopes ou ont une anticipation limitée des conditions futures (e.g. Buongiorno, 2015). Les premiers adoptent des pas de temps de l'ordre de 5 à 10 ans, les seconds ont généralement des pas de temps annuels.

Le rapport que le secteur forêt-bois entretient au temps long change et il est aujourd'hui source d'inquiétude. Le projet PSDR4 AFFORBALL que j'ai coordonné a ainsi permis d'analyser *in situ* l'impact de la crise sanitaire qui affecte actuellement le massif vosgien. Depuis 2018, dans les Vosges du sud, les essences résineuses (sapins, épicéas) sont particulièrement touchées soit directement par les sécheresses et les canicules soit indirectement par les attaques de scolytes favorisées par un affaiblissement général des arbres. La gestion forestière en est bouleversée et s'accompagne d'une forme de sidération des forestiers, les dépérissements étant trop rapides et le temps de réaction trop court pour prendre la distance et le recul nécessaires aux décisions de gestion forestière (Schuppe, 2019). Pour l'économiste spécialiste des FSM, cela pose de nouvelles questions méthodologiques et conduit à considérer les changements climatiques comme un paramètre central dans les modèles. Ce paramètre affecte le stock de capital mais également sa vitesse de régénération et sa nature, la répartition spatiale des essences forestières évoluant rapidement sous l'impulsion d'une adaptation naturelle et/ou d'une migration assistée par l'homme.

### ***Prise en compte de la capacité d'atténuation du changement climatique du secteur forestier : vers une représentation des processus d'émission et de séquestration du carbone dans les FSM***

Si le secteur forestier subit de plein fouet les premières manifestations des changements climatiques, il présente aussi la spécificité de pouvoir contribuer à son atténuation via deux leviers, à première vue, antagonistes. Le premier levier tient en la « séquestration » de carbone dans la biomasse via le mécanisme de photosynthèse. La majeure partie du carbone ainsi séquestré est stockée sur des pas de temps plus ou moins longs dans les écosystèmes forestiers, dans la biomasse vivante, morte, et dans les sols. Une fraction de cette biomasse sert à alimenter les activités humaines et continue de stocker le carbone *ex situ*. L'utilisation de cette biomasse stimule en outre un second levier : la « substitution » dont le principe sous-jacent est de remplacer un produit par un substitut qui fournit le même service pour les activités humaines mais dont le cycle de vie émet moins de gaz à effet de serre (GES). La substitution carbone par les produits bois contribue ainsi de manière significative aux stratégies d'atténuation basées sur les socio-écosystèmes forestiers (Gustavsson et al., 2007).

Le potentiel d'atténuation du secteur forestier combine ainsi des mesures issues de ces deux leviers. En amont, des mesures de densification des forêts, d'afforestation, de reforestation et de diminution de la déforestation permettent d'augmenter le stock de carbone dans les écosystèmes forestiers. En aval, la consommation de produits bois-énergie en substitution aux énergies fossiles et la consommation de certains produits bois en substitution aux produits issus d'autres filières pour la construction, l'isolation, l'emballage ou le mobilier permettent de réduire les émissions d'origine fossile. L'étude de l'activation de ces deux leviers dans le secteur forestier et de ses conséquences économiques et environnementales a fait l'objet d'une littérature riche, à laquelle j'ai participé dans mes travaux depuis ma thèse (e.g. [2] Lecocq et al., 2011; [4] Caurila et al., 2013; [5] Caurila, et al., 2013). Ce front de recherche a été rendu possible par des développements théoriques et méthodologiques substantiels dans les modèles de secteur forestier.

Pour l'étude de la séquestration, la quantification des flux et des stocks de carbone dans les FSM a ainsi fait l'objet de la construction de modules dédiés permettant de comptabiliser les quantités de carbone stockées dans plusieurs compartiments et de les suivre dans le temps. C'est ainsi le cas du « module carbone » développé pour le modèle FFSM comme je le détaille dans la section 2.2 ([12] Lobianco et al., 2016). Par ailleurs, la prise en compte des comportements économiques vis-à-vis de la séquestration du carbone dans les FSM s'est faite soit à travers la monétisation de la séquestration et l'ajout ultérieur à la fonction objectif, ce qui suppose d'en estimer une valeur monétaire comme dans (Sjølie, Latta, et Solberg, 2013) soit à travers des contraintes à la maximisation du surplus social net (Im, Adams, et Latta, 2010).

Pour l'étude de la substitution, la structure mathématique des modèles est peu impactée, le calcul de la substitution passe en effet par l'utilisation d'un « coefficient de substitution » qui, s'il est sujet à controverse<sup>5</sup>, ne modifie pas la représentation des comportements dans le secteur. Néanmoins, afin de gagner en précision sur la représentation des processus technologiques liés à la substitution, de nombreux FSM se sont peu à peu spécialisés. Cela s'est traduit par une augmentation de la complexité des modèles dans leur dimension technologique: les modèles en question modélisent, avec précision, les différents types de biomasse, les technologies de transformation et la demande énergétique. Par exemple, le modèle de Trømborg, Bolkesjø, et Solberg (2007) représente 12 technologies de chauffage au bois et 3 types de biomasse provenant de 6 matières premières différentes, en plus des produits et des industries du bois conventionnels.

### ***Prise en compte des services écosystémiques autres que le bois et la régulation du climat: vers des FSM pour l'étude de la multifonctionnalité des forêts***

L'atténuation du changement climatique et la production de bois ne sont que deux des services écosystémiques rendus par le secteur forestier. Le système socio-écologique qu'est le secteur forestier fournit en effet de nombreux autres services, qu'ils soient marchands ou non marchands (Aznar-Sánchez et al., 2018; Tian et al., 2015). Les forêts fournissent des services de régulation tels que le contrôle de l'érosion, la purification de l'eau, la régulation des inondations et la pollinisation (Sturrock et al., 2011) ainsi que des services culturels tels que les loisirs et la chasse (Milcu et al., 2013). En outre, les forêts abritent une grande partie de la biodiversité mondiale et des habitats pour celle-ci (Brockerhoff et al., 2017). Ces nombreux biens et services sont caractérisés par des relations complexes antagonistes ou synergiques à différentes échelles spatiales et temporelles (Aznar-Sánchez et al., 2018; Garcia, Abildtrup et Stenger, 2018) et, si la gestion forestière a souvent pour principal objectif la production de bois, elle affecte également la fourniture d'autres biens et services (Duncker et al., 2012).

Globalement, les services écosystémiques autres que la séquestration de carbone ont historiquement été moins profondément intégrés aux FSM. La conservation des habitats est généralement quantifiée en termes de perte de bien-être ou de réduction de l'approvisionnement comme nous le montrons dans ([20] Riviere, Cauria et Delacote, 2020). Seuls quelques travaux ont quantifié les impacts de la politique forestière sur la qualité des habitats et certains services écosystémiques sont notablement absents de la littérature utilisant des FSM. C'est le cas de la récréation et, plus généralement, des services culturels, alors qu'il s'agit d'un sujet important dans la littérature sur les services écosystémiques.

### 1.3. Utilisation des modèles : niveau de l'action et instruments économiques

La sous-section précédente a permis de détailler les développements théoriques et méthodologiques des FSM en les situant par rapport au contexte économique et environnemental dans lesquels s'inscrit le secteur forestier. Dans cette courte sous-section, j'aborde la question sous un autre angle, celui de leur utilisation dans une perspective d'aide à la décision. Je distingue ainsi dans la littérature deux groupes de questions : un groupe de nature plus « descriptive » portant sur l'évaluation des impacts des

---

<sup>5</sup> Un axe important de mes perspectives de recherche porte sur le calcul de ce coefficient, voir section 3.1.

trajectoires économiques ou des changements environnementaux sur le secteur forestier et un groupe de nature plus « prescriptive » portant sur le choix du niveau d'action et les instruments économiques à mettre en œuvre dans le secteur.

### ***Les FSM comme outils d'évaluation des impacts des trajectoires économiques et des changements environnementaux***

Les FSM ont été activement utilisés pour évaluer le potentiel de développement des industries de la bioénergie, en particulier à travers leur capacité à atteindre les objectifs en matière de consommation d'énergies renouvelables et les implications pour les autres filières du secteur forestier en termes de compétition ou de synergies (Bolkesjo, Trømborg, et Solberg, 2006; White et al., 2013). Dans cette catégorie, une proportion croissante de travaux cherche à estimer les coûts des trajectoires de développement et les impacts environnementaux de ces trajectoires. Ainsi les contributions récentes portant sur le développement de la bioénergie s'intéressent à l'empreinte environnementale des produits bioénergétiques en abordant la question de la neutralité carbone (Earles et al., 2013; Sjølie et al., 2010), des stocks de carbone et des changements d'utilisation des terres (Böttcher et al., 2013) ou les implications pour les paysages et les habitats (Costanza et al., 2017).

Outre l'impact du développement des filières bioénergétiques, un autre groupe de travaux cherche à évaluer les impacts du changement climatique sur les marchés du bois, les industries et les ressources forestières (*e.g.* Solberg, Moiseyev, et Kallio, 2003; Beach et al., 2015). Les impacts analysés comprennent les ravageurs et les maladies, les incendies de forêt ou les tempêtes (voir [20] Riviere, Cauria, et Delacote, 2020). Les impacts sont alors analysés à travers leur coût économique *ex post*, qu'il s'agisse du coût direct sur les marchés ou du coût des plans de relance, ou de leur coût *ex ante* à travers des mesures de prévention.

Enfin, un troisième groupe de travaux explore les impacts des mesures de conservation sur le secteur forestier. Ce groupe cherche à évaluer les compromis entre l'activité économique et la conservation des habitats, généralement quantifiée en termes de perte de bien-être ou de réduction de l'approvisionnement en bois (*e.g.* Geijer, Bostedt, et Brännlund, 2011; Hänninen et Kallio, 2007). D'autres études abordent la question des compromis dans les zones sujettes à la déforestation (Merry et al., 2009) et les implications économiques des obstacles au commerce du bois illégal (Moiseyev et al., 2010; Sun et Bogdanski, 2017)

### ***Les FSM comme outils d'analyse du niveau de l'action et des instruments économiques***

Les FSM ont par ailleurs été largement utilisés pour comparer l'efficacité de mesures de politiques de stimulation de la production ou de la consommation de produits bois, comme, par exemple, des subventions à la consommation de bois (*e.g.* Sjølie et al., 2010). Plus généralement, un groupe conséquent de travaux explore le potentiel d'atténuation du secteur forestier et cherche à déterminer les politiques les plus efficaces pour en tirer parti. Dans ces travaux, la quantification des flux et des stocks de carbone passe par la monétisation permettant d'attribuer une valeur monétaire au carbone stocké et aux émissions évitées (van Kooten et Johnston, 2016). Dans cette veine, certains articles explorent des paiements pour la séquestration du carbone en forêt (*e.g.* Buongiorno et Zhu, 2013) ou des systèmes de taxe-subsidation sur le carbone à l'échelle du secteur (*e.g.* Sjølie, Latta, et Solberg, 2014)

Peu de contributions portent sur les instruments économiques pour d'autres objectifs que le bois ou l'atténuation du climat. Ainsi, dans la plupart des cas, la conservation ne fait pas l'objet d'instrument économique, elle n'entre pas dans la fonction objectif, n'est pas modélisée explicitement et est introduite par des contraintes au problème de l'optimisation, c'est-à-dire que la terre est retirée de la production ([20] Riviere, Cauria, et Delacote 2020).

## 1.4. Position de mes travaux dans la littérature des modèles de secteur forestier

Les deux sous-sections précédentes nous permettent de dessiner une carte de la littérature économique sur le secteur forestier utilisant les FSM avec, sur l'axe des abscisses, l'objet de l'étude (développement méthodologique, impacts des trajectoires et des changements globaux ; choix des instruments économiques) et, sur l'axe des ordonnées, la ou les caractéristiques du secteur forestier qui sont abordées (changements d'échelles, rapport au temps et adaptation, séquestration de carbone, substitution carbone, autres services écosystémiques). Sur la figure 2, je situe sur cette carte les travaux dont je suis auteur ou co-auteur<sup>6</sup>.

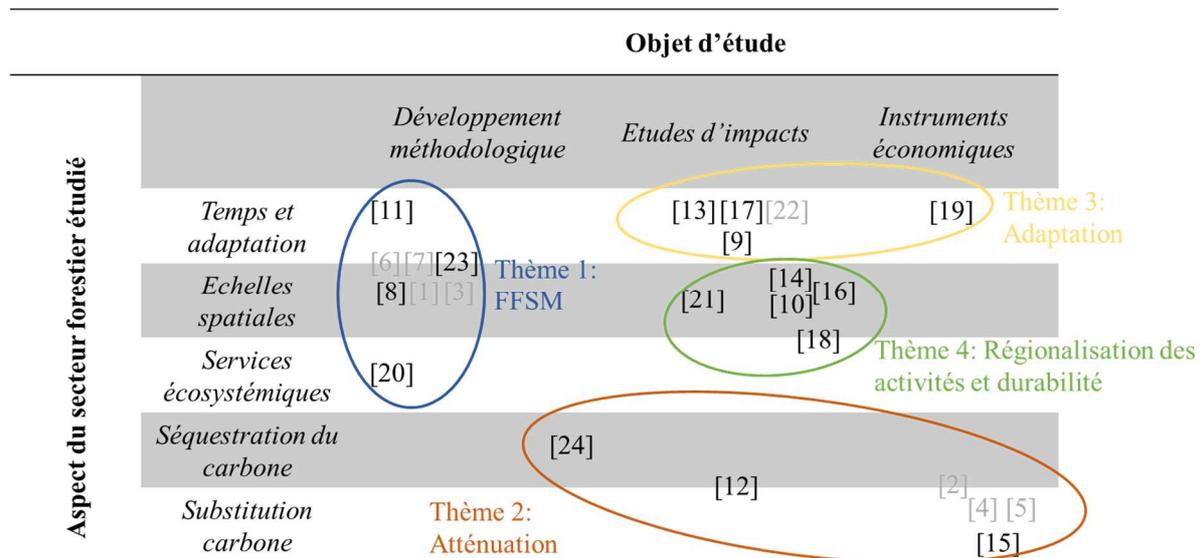


Figure 2: cartographie de mes travaux selon deux axes. L'axe des abscisses décrit l'objet de l'étude et l'axe des ordonnées se réfère au caractère du secteur forestier étudié. Les numéros des publications sont les mêmes que ceux utilisés dans la section 1 du présent rapport. Les numéros grisés correspondent aux publications de ma thèse ou issues de mes travaux de thèses, que je ne détaille pas dans ce mémoire.

Je distingue sur cette figure quatre groupes de travaux, qui constituent les quatre thèmes de recherche que je présente dans la section suivante.

Le thème 1 (section 2.1) regroupe des travaux d'essence résolument méthodologique et correspond au développement des différentes versions du modèle FFSM « French Forest Sector Model ». La première version du modèle dite « version 1.0 » ayant fait l'objet de ma thèse, je la présente rapidement sans en détailler tous les composants et je me concentre plutôt sur les développements effectués depuis. En particulier, je présente la manière dont l'hétérogénéité spatiale de la ressource et la représentation des comportements d'anticipation de long terme ont été intégrées dans le modèle initial. Je m'appuie pour cela sur deux contributions réalisées avec mes collègues de l'équipe modélisation au BETA ([8] Lobianco et al., 2015; [11] Lobianco et al., 2016).

Le thème 2 (section 2.2) regroupe les travaux s'appuyant sur les versions « 1.0 » et « ++ » de FFSM pour explorer les impacts sectoriels d'instruments économiques mis en place pour stimuler le rôle du secteur forestier dans l'atténuation du changement climatique (taxe carbone, paiement à la séquestration en forêt, subvention à la biomasse énergie, etc.). Ma thèse ayant porté pour partie sur cette question, je ne présente pas les papiers qui en sont issus et je me concentre sur trois contributions post-thèse : d'une part, le développement d'un module de comptabilité carbone dans FFSM++ ([12] Lobianco et al., 2016) permettant de comptabiliser le stockage de carbone en forêt et dans la filière et d'estimer le carbone

<sup>6</sup> Par souci de compacité, je ne joins pas les articles en annexe mais j'indique les liens électroniques dans la bibliographie.

substitué dans la filière, d'autre part le couplage entre FFSM 1.0 et un modèle de production d'électricité pour comparer les impacts d'une utilisation du bois énergie pour la production de chaleur ou pour la production d'électricité ([15] Caurla et al., 2018) et, enfin, un développement récent dans FFSM++ permettant de représenter les comportements des gestionnaires forestiers qui prendraient en compte la valeur de la séquestration du carbone en forêt dans leur gestion et les conséquences sur les paysages forestiers à long terme ([24] Riviere et Caurla, 2020b).

Le thème 3 (section 2.3) regroupe des travaux qui explorent les impacts du changement climatique sur le secteur forestier et les instruments nécessaires pour son adaptation. J'étudie en particulier trois effets directs et indirects des changements climatiques sur le secteur forestier : les diffusions de pathogènes (insectes, champignons, etc.), les sécheresses et les tempêtes. J'explore les impacts économiques de ces effets dans la filière à plusieurs échelles géographiques dans ([17] Petucco, Lobianco, et Caurla, 2020), j'analyse des solutions d'adaptation alternatives pour la prévention des pathogènes dans ([13] Brunette et Caurla, 2016), j'étudie le bien-fondé des plans de compensation gouvernementaux dans ([9] Caurla, Garcia, et Niedzwiedz, 2015) et j'aborde la question de la valeur économique des services climatiques pour les sécheresses dans ([19] Caurla et Lobianco, 2020).

Enfin le thème 4 (section 2.4) s'intéresse à la question de la (re-)localisation des activités économiques et de leurs conséquences en terme de durabilité. J'aborde en premier lieu cette problématique à travers une réflexion interdisciplinaire associant économie et géographie dans ([21] Lenglet et Caurla, 2020) puis, de manière opérationnelle, à travers des couplages entre modèles économiques et outils d'évaluation environnementale ([14] Lenglet, Courtonne, et Caurla, 2017; 2016; [16] Beaussier et al., 2019) et à l'aide de modèles de dynamique forestière dans ([18] Fortin et al., 2019).

## 2. Présentation détaillée de mes travaux

### 2.1. Thème 1 : développements du modèle FFSM

#### *De la version FFSM 1.0 à la version FFSM++*

Le développement du French Forest Sector Model (FFSM) a commencé en 2008 avec le début de ma thèse sous la direction de Franck Lecocq, aujourd'hui directeur du CIRED<sup>7</sup> et directeur adjoint du Laboratoire d'Economie Forestière en 2008. Il s'agissait à l'époque de développer un modèle de simulation capable de représenter l'économie du secteur forestier en lien avec la dynamique de la ressource forestière à l'échelle nationale, ceci afin de simuler les impacts des politiques climatiques sur l'économie du secteur forêt-bois et sur la dynamique de la ressource. La version FFSM 1.0 qui en résulte permet de projeter, avec un pas de temps annuel et de manière récursive, l'évolution de variables économiques (prix des produits bois, quantités offertes et consommées) et de variables biophysiques (stocks de bois en forêt et dans la filière) à un horizon temporel relativement court (10-15 ans) et à une échelle spatiale relativement agrégée (anciennes régions administratives). Pour cela, FFSM 1.0 combine deux modules : un module « marché » et un module « ressource ». Ces deux modules sont représentés sur la figure 3.

Le module « marché » est un modèle d'équilibre partiel des marchés du bois régionalisé qui repose sur la théorie du prix d'équilibre spatial de Samuelson (1952). La résolution en équilibre partiel du modèle implique que les effets de rétroaction entre la filière forêt-bois et le reste de l'économie française ne sont pas pris en compte, hypothèse acceptable du fait de la faible part de la filière forêt-bois dans l'économie française (moins de 1 % du PIB). Le module calcule, pour chaque région administrative, les quantités produites, consommées et échangées et les prix régionaux sont déterminés de manière endogène pour 3

---

<sup>7</sup> Centre international de recherche sur l'environnement et le développement.

produits bois primaires<sup>8</sup> et 6 produits bois transformés<sup>9</sup>, en maximisant le surplus économique total net des coûts de transport entre régions. L'offre de bois est élastique par rapport aux prix et aux volumes de bois disponibles en forêt, et la transformation de produits primaires en produits transformés est représentée par une fonction de production de type Leontief. En outre, les produits bois français peuvent être échangés avec le reste du monde, mais ils sont alors modélisés comme des substituts imparfaits aux produits internationaux (Armington, 1969). Le module marché communique avec le module « ressource » à travers le volume récolté en forêt (relation n°2 sur la figure 3), qui correspond à la répartition uniforme de l'offre optimale calculée dans le module marché sur les parcelles forestières de la région administrative.

Le module « ressource » de FFSM 1.0 est un modèle de dynamique forestière basé sur une matrice de transition ([3] Wernsdörfer et al., 2012) pour laquelle le volume de bois en forêt est représenté à l'échelle des anciennes régions administratives françaises. Le volume initial est calibré à l'aide des données de l'inventaire forestier national de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) en distinguant 13 classes de diamètres, trois catégories d'essences (résineux, feuillus et mélange résineux-feuillus) et trois types de gestion (futaies, taillis et mélange taillis-futaie). La croissance des forêts est modélisée de manière récursive en attribuant aux arbres de chaque classe de diamètre trois paramètres : un « temps de passage » qui représente le temps nécessaire pour passer à la classe supérieure, un « taux de mortalité naturelle » représentant la possibilité qu'un arbre meure et le « taux de récolte » provenant du module marché. Les deux premiers paramètres sont estimés à partir des données de l'inventaire forestier national (voir Caurla, 2012). En retour, le module ressource fournit au module marché l'information sur le volume disponible en forêt (relation n°1 sur la figure 3), qui est intégré à deux niveaux : d'une part dans la spécification de la fonction d'offre elle-même et d'autre part comme contrainte à la maximisation sous contraintes (on suppose qu'on ne peut pas récolter plus que ce qui est disponible).

---

<sup>8</sup> Bois d'œuvre (feuillu et résineux) et bois d'industrie.

<sup>9</sup> Sciages (feuillus et résineux), placages, bois-énergie, pâte à papier et panneaux.

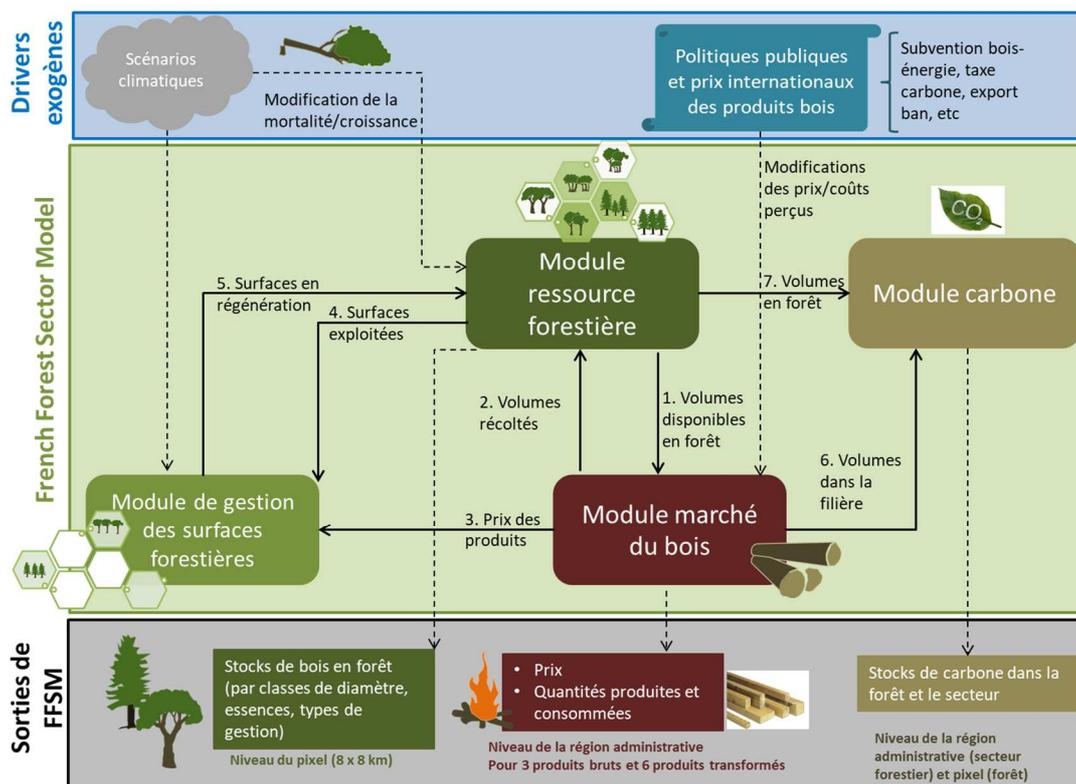


Figure 3 : représentation schématique des modules du modèle FFSM. La version 1.0 est composée du module « marché » et du module « ressource ». La version FFSM++ leur associe, en plus, le module « gestion des surfaces » et le module « carbone ».

Par rapport à FFSM 1.0, la version FFSM++ se distingue conceptuellement par l'ajout de deux modules : le module « carbone » et le module « gestion des surfaces forestières ». Le module carbone est détaillé dans la sous-section 2.2 qui présente l'axe « atténuation » de mes travaux. Ici, je présente le fonctionnement du module de gestion des surfaces forestières et son apport pour l'étude du secteur forestier.

Le développement de ce module part du constat que la version 1.0 de FFSM ne convient pas pour faire des projections sur des horizons temporels lointains (50-70 ans) car les modules « ressource » et « marché » ne tiennent pas compte des décisions de long terme des gestionnaires forestiers quant aux choix des essences à régénérer et le type de gestion à appliquer sur les surfaces rendues libres par l'exploitation des arbres. En d'autres termes, dans FFSM 1.0, on suppose que les terres libérées sont replantées à l'identique. Pour y remédier, le module de gestion des surfaces est développé dans l'idée de représenter les décisions des gestionnaires de forêts quant à la régénération pratiquée en intégrant leur perception de déterminants exogènes comme le changement climatique ou l'évolution des cours du bois. L'idée est ainsi de rendre endogène le choix du type de forêt à régénérer (essences/types de gestion) compte tenu des conditions de marché et des conditions climatiques projetées. Pour cela, les volumes exploités calculés dans le module « ressource » sont transformés en surfaces libérées (relation n°4 sur figure 3) puis le module choisit la meilleure alternative de régénération en se basant sur la maximisation de la valeur actualisée nette des différentes options. Une fois les surfaces « régénérées », elles sont réintégrées au module ressource (relation n°5 sur figure 3).

### **Introduction d'une nouvelle échelle spatiale dans ([8] Lobianco et al. 2015)**

Une première modification majeure nécessaire pour l'ajout du module « gestion des surfaces forestières » concerne l'échelle de représentation des décisions. Une représentation spatiale détaillée est en effet essentielle pour décrire les conditions dans lesquelles les agents économiques opèrent et

pour tenir compte le plus précisément possible des déterminants exogènes environnementaux. En effet, dans une région homogène (et avec des agents homogènes), l'investissement forestier « optimal » serait le même partout, et le modèle ne pourrait pas représenter la richesse forestière. Ainsi, alors que la représentation spatiale de FFSM 1.0 s'organise en deux niveaux (national et régional), nous introduisons dans FFSM++ un nouvel échelon, le « pixel », correspondant à un carré de 8 km par 8 km (soit 8580 pixels pour la France). Dans chaque pixel, la proportion relative de la surface occupée par la forêt est reportée ainsi que, au sein des forêts, la répartition par type de gestion et par essence (la répartition exacte des terres à l'intérieur du pixel n'est pas définie, voir figure 4). Cette opération est réalisée en couplant les données de l'inventaire forestier national avec les données de Corine Land Cover comme détaillé dans ([8] Lobianco et al., 2015).

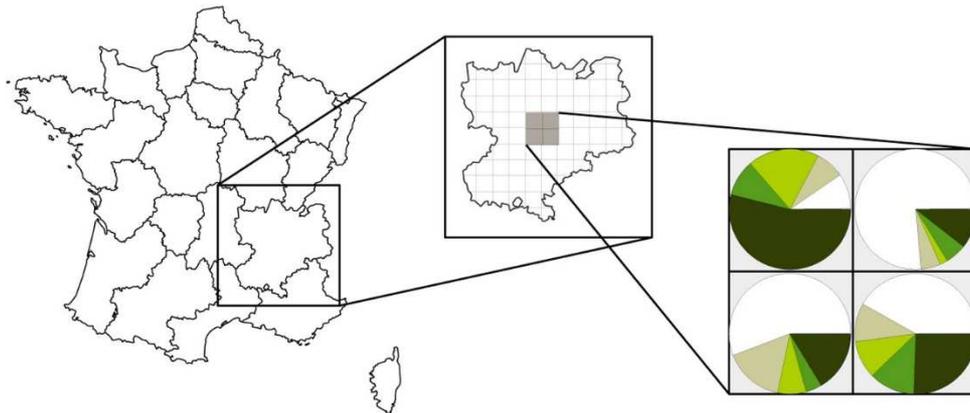


Figure 4 : représentation des trois échelles dans FFSM++. Chaque pixel contient des informations sur les différentes zones forestières (en vert sur la figure, chaque nuance de vert illustrant une combinaison essence/type de gestion spécifique) ainsi que sur la zone non forestière (en blanc).

L'avantage de l'échelle pixel est multiple. D'une part, en recoupant les informations spatiales issues d'autres sources comme les modèles numériques de terrain, elle permet de tenir compte des déterminants socio-économiques et biophysiques impactant directement la gestion forestière (altitude, pente, présence de zones de protection, etc.). D'autre part, elle permet de rendre compte de l'hétérogénéité des comportements de gestion. Enfin, elle permet de rendre compte de l'hétérogénéité dans la croissance forestière à l'échelle d'une région. Sur ce dernier point, s'il n'est pas possible d'estimer des taux de croissance et de mortalité à l'échelle de chaque pixel, il est en revanche possible de tenir compte de la variance régionale afin de tenir compte de cette hétérogénéité<sup>10</sup>.

#### ***Introduction des anticipations de long terme dans chaque pixel dans ([11] Lobianco et al., 2016)***

Pour chaque pixel, le module de gestion des surfaces forestières calcule les rendements espérés sous la forme d'un revenu annuel équivalent de chaque type de forêt<sup>11</sup>. Pour cela, la temporalité du modèle change : d'une structure purement récursive, le modèle passe à une structure hybride qui associe l'optimisation intertemporelle à la résolution statique-récursive. Cette transition permet de représenter une plus grande richesse de comportements de gestion forestière. A ce niveau nous intégrons trois catégories d'hétérogénéité dans les comportements. Premièrement, nous supposons qu'il existe une hétérogénéité des gestionnaires forestiers dans la perception des prix futurs. Certains gestionnaires, totalement myopes, forment leurs anticipations à la date  $t$  sur la base du prix observé à cette même date  $t$  : ces gestionnaires ne sont pas capables d'anticiper l'évolution des prix futurs. Compte tenu de la volatilité des prix, qui dépend en partie d'évènements climatiques extrêmes et ponctuels, c'est une hypothèse vraisemblable. En revanche, nous introduisons la possibilité que certains gestionnaires

<sup>10</sup> Pour cela, les moyennes régionales des taux de croissance sont toujours utilisées, mais un modificateur du temps de passage est introduit dans chaque pixel, il est échantillonné à partir d'une distribution normale avec la moyenne fixée à un et l'écart-type dérivé des données de l'IGN et spécifique au groupe d'espèces et à la région.

<sup>11</sup> Un type de forêt est défini par son essence dominante et son type de gestion.

puissent formuler leurs anticipations en tenant compte d'une projection des prix futurs<sup>12</sup> à travers un coefficient de « clairvoyance ». Etant donné la nature récurrente du modèle, les futurs prix régionaux ne sont pas disponibles à une date  $t$ . Nous les approximations à l'aide d'un ratio des prix internationaux futurs et actuels fournis par un autre modèle de secteur forestier global (Global Forest Products Model, voir Buongiorno, 2015). Deuxièmement, nous introduisons un coefficient rendant compte de l'hétérogénéité dans l'anticipation des conditions environnementales : si certains gestionnaires sont totalement myopes face aux conditions futures, certains peuvent au contraire anticiper les modifications climatiques. Enfin, troisièmement, nous supposons une hétérogénéité dans l'aversion au risque des gestionnaires.

***Résultats : une modification sensible de la projection des paysages forestiers lorsque les anticipations sont intégrées au modèle via le module de gestion des surfaces***

Globalement, à l'échelle nationale, les forêts de conifères présentent des rendements économiques plus de deux fois supérieurs aux forêts feuillues. Au niveau régional, les résultats sont plus nuancés mais les rendements des forêts feuillues sont presque toujours inférieurs à ceux des forêts de conifères. Ainsi, lorsque les gestionnaires adoptent une gestion active de leur forêt basée sur la maximisation des profits, ils ont tendance à favoriser les essences résineuses lors de la régénération. Par conséquent, la prise en compte des anticipations de long terme dans le module de gestion des surfaces entraîne une modification des paysages forestiers en faveur des forêts de conifères. Pour autant, l'effet sur le stock forestier reste très limité. En 2100, à l'échelle nationale, les variations des volumes forestiers sont de -37,9 et + 143,1 Mm<sup>3</sup>, respectivement pour les forêts de feuillus et de conifères, pour des volumes totaux respectifs d'environ 4800 et 1200 Mm<sup>3</sup>.

Néanmoins, nous montrons que cette conclusion est susceptible d'être modifiée lorsqu'on tient compte à la fois des modifications climatiques futures et de l'aversion au risque des gestionnaires. En effet, lorsqu'on tient compte des effets du changement climatique à l'échelle nationale (en reprenant les données issues de Loustau, 2004; Allen et al., 2010), il s'ensuit une augmentation des rendements attendus pour les feuillus (+ 25 %) et une diminution de ceux des conifères (- 24 %), ce qui conduit à une augmentation de la régénération en forêts feuillues (+ 41 %). Ceci s'explique d'une part par un effet positif de stimulation de la croissance du changement climatique sur les feuillus dans le nord de la France (jusqu'à + 10 %) et un effet de réduction de la croissance sur les conifères dans les régions du sud (jusqu'à -32 %) et, d'autre part, par une défiance des gestionnaires averses au risque vis-à-vis des essences résineuses qui présentent un risque de mortalité plus élevé.

## 2.2. Thème 2 : atténuation du changement climatique

La question du rôle des forêts dans l'atténuation du changement climatique est une préoccupation centrale depuis mes débuts dans la recherche. Dans ma thèse, je montre qu'à court terme, une politique de séquestration du carbone en forêt est plus efficace en terme de réduction des émissions et moins coûteuse qu'une politique basée sur un instrument de type subvention à la substitution énergétique ([2] Lecocq et al., 2011). Néanmoins la séquestration en forêt présente des contraintes techniques (mesure de la séquestration, choix d'une référence), mais aussi politiques et économiques (e.g. présence de coûts de transaction importants) ainsi que des risques de non-permanence, qui ont conduit à axer la stratégie d'atténuation globale du secteur forestier sur la substitution. Les instruments politiques pour stimuler cette substitution sont potentiellement nombreux (subvention au bois-énergie, taxe carbone, contrat d'approvisionnement) et j'analyse leurs impacts économiques et leur capacité à atteindre les objectifs de réduction d'émission dans deux articles ([4] Caurla et al., 2013; [5] Caurla et al., 2013). Depuis ma thèse, les travaux réalisés avec le modèle FFSM et portant sur l'atténuation ont pris trois directions. D'une part nous avons développé un module de comptabilité carbone, quatrième et dernier pilier du

---

<sup>12</sup> Ce gain d'information qui permet aux gestionnaires de prendre des décisions plus « éclairées » est appelé « service climatique ». Je détaille ce concept qui a fait l'objet d'une publication ([19] Caurla et Lobianco, 2020) dans la section 2.3 de ce bilan.

modèle FFSM++ (voir figure 3). Ensuite, nous avons approfondi la question des impacts de l'utilisation du bois à des fins énergétiques en comparant l'utilisation de bois-énergie pour la production de chaleur et son utilisation pour la production d'électricité. Enfin, en s'appuyant sur les développements méthodologiques présentés dans la section 2.1, nous avons analysé les conséquences à long terme de la prise en compte de la valeur de la séquestration du carbone en forêt sur les paysages forestiers métropolitains.

### ***Comptabiliser les flux et les stocks de carbone dans le secteur forestier : calcul de la capacité d'atténuation totale de la forêt française***

Dans mes travaux de thèse, les impacts en terme d'atténuation sont calculés à travers des hypothèses simples sur le contenu carbone des produits bois ou de la biomasse vivante et en utilisant des coefficients de substitution « agrégés ». Le développement d'un module dédié à la comptabilité carbone dans FFSM, décrit dans ([12] Lobianco et al., 2016) a permis de tracer (a) le carbone séquestré dans la biomasse vivante et morte de la forêt ; (b) le carbone séquestré dans les produits bois ; (c) le carbone non émis lorsque des produits bois sont utilisés à la place de combustibles fossiles ou de matériaux à plus forte intensité énergétique (« effet de substitution »); et (d) le carbone libéré par les opérations forestières.

L'ajout de ce module dans le modèle FFSM représentait, pour l'époque, une contribution majeure à la littérature en permettant d'évaluer la capacité d'atténuation du secteur forestier national dans un cadre intégré, c'est-à-dire en tenant compte des effets du changement climatique sur la végétation, la réponse des gestionnaires forestiers et les dynamiques de marché. En utilisant ce module, nous montrons que, dans un scénario business-as-usual (BAU), autrement dit sans mise en place d'instruments politiques en faveur de l'atténuation, le secteur forestier peut contribuer à l'atténuation de 66 à 125 MtCO<sub>2</sub> éq par an<sup>13,14,15</sup>, selon que l'on considère uniquement le compartiment « biomasse forestière aérienne », les stocks de bois dans la filière et l'effet de substitution énergétique ou si l'on tient compte, en outre, du carbone stocké dans les compartiments branches et racines et que l'on considère également la substitution matériau, potentiellement importante mais beaucoup plus incertaine. En intégrant les conséquences du changement climatique sur les paramètres de croissance en forêt dans le modèle à partir des résultats de (Loustau, 2010), il apparaît que l'effet global d'atténuation du secteur forestier pour la période est réduit de 6,6 à 5,8 %, pour atteindre une fourchette de 61,8 à 118,0 MtCO<sub>2</sub> éq par an, respectivement pour les mêmes hypothèses de comptabilité.

Par ailleurs, nous montrons dans ce travail qu'il existe, à long terme, un effet de saturation du puits forestier *in situ*: sur la période 2007-2100, 86% de la séquestration en forêt se produit avant 2070, date après laquelle la capacité du puits forestier décroît considérablement. Ce résultat est en phase avec la littérature sur le sujet (*e.g.* Werner et al., 2005) et suggère qu'à court terme, une stratégie basée sur la séquestration est plus efficace tandis qu'à long terme (qui se situe vers le milieu du siècle dans notre simulation) c'est la substitution qui permet de maintenir le potentiel d'atténuation. Ce résultat pose néanmoins la question de la viabilité d'une stratégie basée sur la séquestration, alors que les risques de dégradation des peuplements (tempêtes, pathogènes, incendie, etc.) augmentent *a priori* avec l'âge et la densité des peuplements. Néanmoins, l'expertise INRA-IGN sur le rôle de la forêt dans l'atténuation à laquelle j'ai participé montre que, même en considérant des aléas climatiques futurs bien plus marqués qu'aujourd'hui, cela ne remet pas en cause cet ordre de mérite et la séquestration reste plus efficace, au moins jusqu'à l'horizon 2050 (Roux et al., 2017).

### ***Impacts à long terme d'une stratégie basée sur la séquestration en forêt sur les paysages forestiers métropolitains***

<sup>13</sup> Valeur moyenne sur la période 2007-2100.

<sup>14</sup> A titre de comparaison, en 2017, la France émettait environ 306 MtCO<sub>2</sub> éq par an.

<sup>15</sup> Ces résultats sont comparables à l'étude INRA-IGN sur le rôle des forêts dans l'atténuation (Roux et al., 2017) qui aboutit à une fourchette de 67,9-129,8 MtCO<sub>2</sub> éq par an, pour les mêmes hypothèses.

La question des conséquences de la stimulation de la séquestration est le point de départ d'une contribution récente issue de mes travaux avec Miguel Rivière ([24] Rivière et Caurila, 2020b). Dans ce travail, nous modifions le calcul du bénéfice actualisé en séquence infinie (BASI) des parcelles forestières à l'échelle du pixel dans le module « gestion des surfaces » afin d'y intégrer la valeur de la séquestration du carbone en nous basant sur le modèle seminal de Hartman (1976). De cette manière, nous supposons que les gestionnaires prennent en compte la valeur du carbone (« rente carbone ») stocké et séquestré dans leur forêt. Nous modifions, par ailleurs, le module marché de FFSM de sorte que la « rente carbone » induise un coût d'opportunité pour l'offre de bois.

Nos résultats montrent que, sans valeur du carbone (scénario BAU), les stocks de carbone *in situ* (en forêt) augmentent à l'échelle nationale, passant de 5,2 GtCO<sub>2</sub> éq en 2020 à 10,1 GtCO<sub>2</sub> éq en 2100, tandis que la séquestration annuelle du carbone en forêt (c'est-à-dire la quantité de carbone stockée sur une année) diminue de 89 MtCO<sub>2</sub> éq par an à 38,8 MtCO<sub>2</sub> éq par an, traduisant l'effet de saturation déjà mis en évidence dans ([12] Lobianco al., 2016). Lorsqu'une valeur tutélaire du carbone est considérée<sup>16</sup>, le stock est supérieur de 55 à 80 MtCO<sub>2</sub>éq par rapport à celui du BAU en 2050 selon la valeur du carbone testée. En 2100, ce stock est supérieur de 390 à 550 MtCO<sub>2</sub>éq. L'augmentation de ce stock à court et moyen terme est principalement dû à la diminution des récoltes, conséquence du coût d'opportunité induit par la valeur carbone. Cette tendance générale cache des différences entre les régions : si la récolte diminue au niveau national, elle augmente certaines régions, résultat d'une redistribution de l'exploitation forestière afin de satisfaire la demande nationale.

Par ailleurs les pratiques de gestion présentent des différences importantes lorsque la valeur du carbone est prise en compte dans les décisions de gestion. D'une part les temps de révolution en forêt augmentent (voir figure 5), ce qui est conforme à la littérature existante sur le sujet (van Kooten et Johnston, 2016).

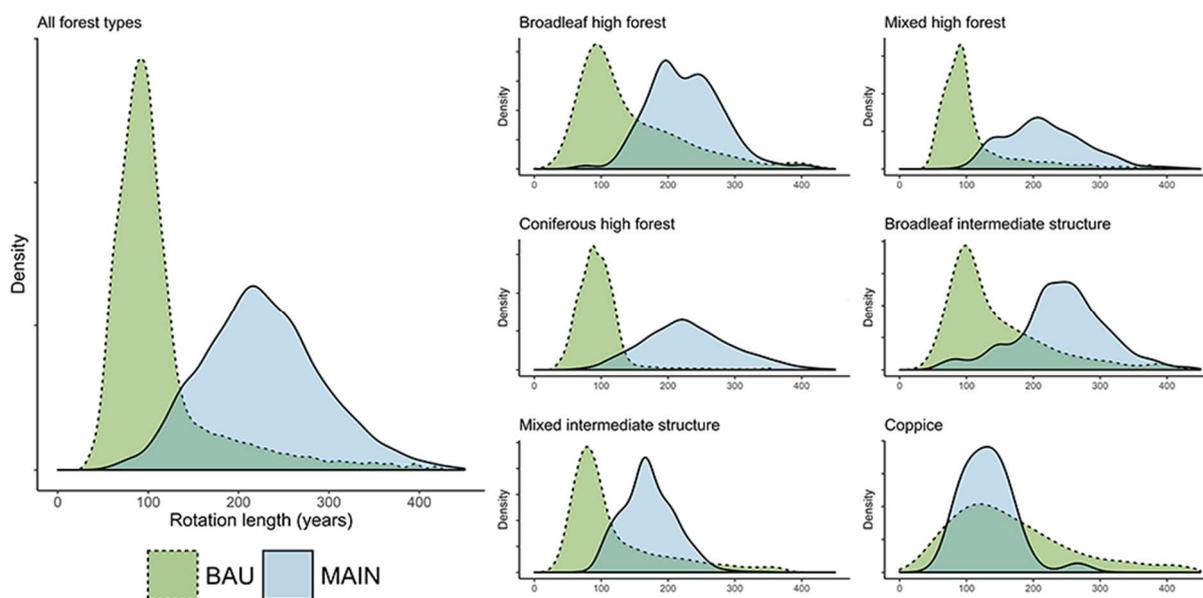


Figure 5: temps de révolutions par type de forêt dans le scénario sans (BAU) et avec (MAIN) paiement pour la séquestration carbone. Les abscisses représentent les durées de révolution en années (Rivière et Caurila 2020b).

D'autre part, si, comme nous le montrions dans ([11] Lobianco et al., 2016), les choix de régénération se portent toujours majoritairement sur les forêts de conifères, on observe néanmoins une diminution de la

<sup>16</sup> Pour tester l'impact d'un paiement carbone, nous nous basons sur la valeur du carbone estimée dans (Quinet, 2019). Ce rapport a été commandé par le Gouvernement français pour guider les politiques publiques, calibrer les incitations et fournir un indicateur de la valeur que la société française devrait attribuer aux actions d'atténuation. Dans le rapport, le prix du carbone passe de 87€/tCO<sub>2</sub>éq en 2020 à 250€/tCO<sub>2</sub>éq en 2030 et à 775€/tCO<sub>2</sub>éq en 2050.

proportion de ces dernières lorsqu'une rente carbone est appliquée. A l'échelle nationale, les conifères représentent ainsi 68,3 % des choix de régénération dans le scénario BAU, mais uniquement 56,7 % dans un scénario avec prise en compte de la valeur du carbone. A l'inverse, les investissements dans les futaies mixtes passent respectivement de 8,5% à 11,5%, et les investissements dans les futaies de feuillus passent de 8,4% à 17%. Une analyse de ces résultats au niveau du pixel montre que les cas où les investissements se détournent des forêts de conifères vers d'autres types de forêts correspondent aux zones dans lesquelles les forêts de conifères présentent un potentiel de croissance *relativement* plus faible. Ainsi à long terme, le changement des types de forêt contribue largement à la séquestration additionnelle en forêt.

Au fil du temps, ces changements dans les décisions d'exploitation et de gestion entraînent des modifications des paysages forestiers, comme l'illustre la figure 6. Ainsi, à l'échelle nationale en 2100, avec un paiement pour la séquestration du carbone, les paysages forestiers sont moins résineux (-12,6%, -560 000 ha) et présentent une plus grande proportion de forêts mixtes (+6,44%, 130 000 ha) et de feuillus purs (+5,6%, 430 000 ha). Toutefois, ces résultats présentent également des disparités régionales importantes.

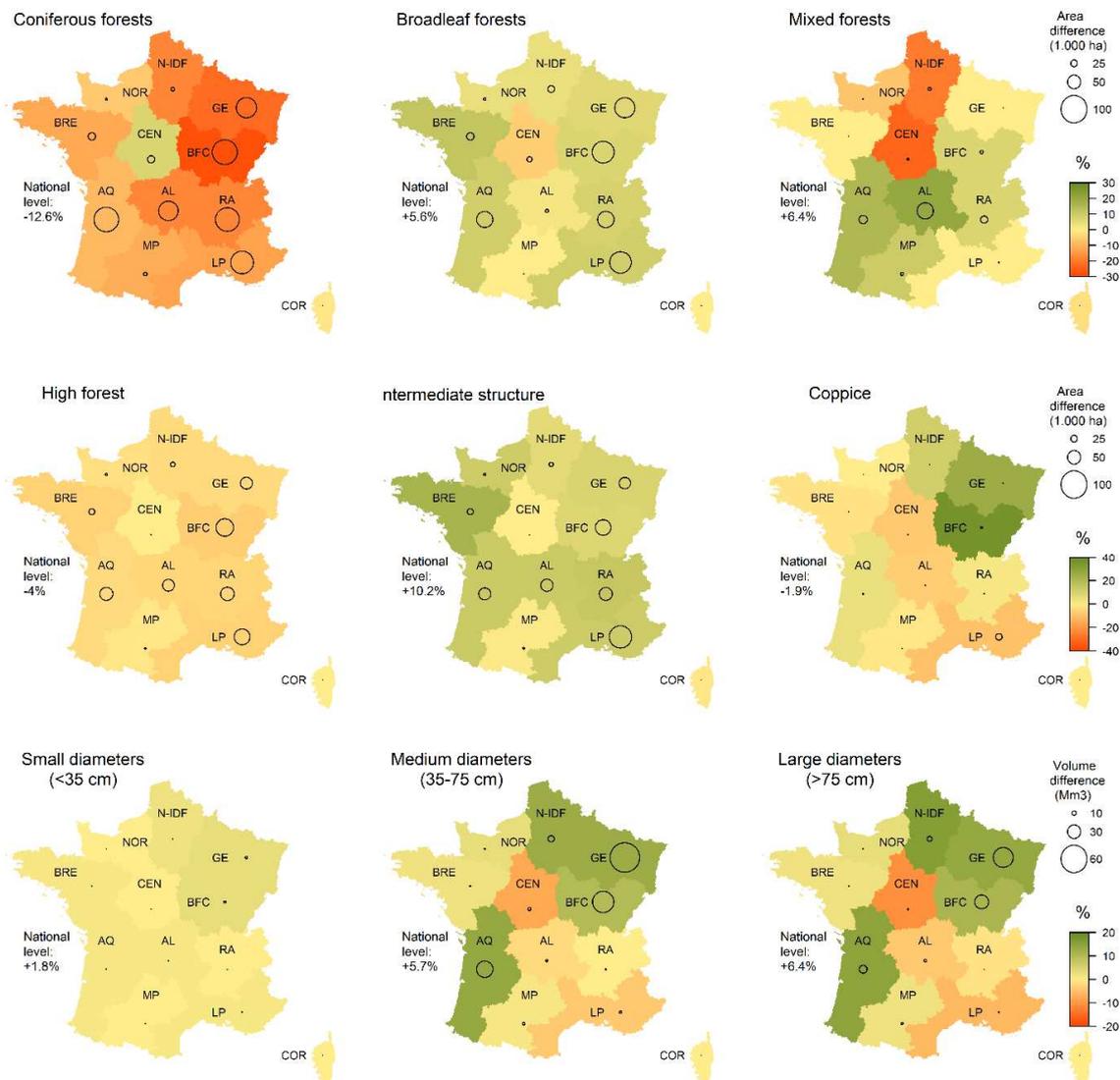


Figure 6: structure et composition des forêts françaises en 2100 dans un scénario avec rente carbone par rapport au BAU. La taille des cercles indique les différences absolues de surfaces ou de volumes, les couleurs indiquent les différences relatives (Riviere et Cauria, 2020b).

Cette diversification des paysages forestiers, tant en termes de composition que de structure forestière, présente en outre d'autres bénéfices, notamment en terme d'habitats pour la biodiversité (Gamfeldt et al., 2013; van der Plas et al., 2016). Les forêts diversifiées sont par ailleurs plus résistantes à certaines perturbations biotiques ou abiotiques (Jactel et al., 2009; Bauhus et al., 2017). Les incitations à la séquestration peuvent ainsi offrir des co-bénéfices en plus de l'atténuation du changement climatique.

### ***Substitution énergétique : quelles conséquences économiques et environnementales de l'utilisation de biomasse pour la production d'électricité en remplacement du nucléaire ?***

En France, la production d'électricité a historiquement été dominé par l'énergie nucléaire, qui a fait de l'électricité française l'une des moins émettrice de gaz à effet de serre parmi les pays de l'UE. La « Loi sur la transition énergétique », récemment adoptée<sup>17</sup>, vise, entre autres, à réduire la proportion d'énergie nucléaire d'ici 2025. Par ailleurs la France s'est engagée à respecter les objectifs européens et nationaux de production d'énergie issue de sources renouvelables. Pour le secteur de l'électricité, il est donc attendu qu'une partie de la réduction de la capacité nucléaire soit compensée par une augmentation de la part des énergies renouvelables, parmi lesquelles la biomasse, et notamment le bois, devrait jouer un rôle majeur. Néanmoins, la biomasse bois est une ressource convoitée, et la demande de bois pour la production de chaleur continue d'augmenter, stimulée par divers instruments économiques (e.g. fond chaleur, crédits d'impôts).

Dans ([15] Cauria et al., 2018) nous comparons les retombées économiques (coûts sectoriels et sociétaux) et environnementales (émissions de gaz à effet de serre) d'une utilisation de la biomasse bois pour la production de chaleur et celles d'une utilisation pour la production d'électricité. L'évaluation de ces retombées est rendue complexe par le télescopage de divers instruments économiques et leviers politiques qui peuvent être mobilisés de manière concomitante: réduction de la capacité nucléaire (démantèlement des centrales), instauration d'un prix carbone, augmentation de la capacité des centrales dédiées fonctionnant à la biomasse ou des centrales de co-combustion et, enfin, subvention de l'utilisation de bois énergie. Nous testons ainsi dans ce travail plusieurs scénarios en combinant deux modèles sectoriels, la version 1.0 de FFSM et un modèle de production d'électricité « Green Electricity Simulate » (GES) (Bertrand, Dequiedt, et Le Cadre, 2014). Le couplage de plusieurs modèles sectoriels en équilibre partiel est un cadre d'analyse qui présente l'énorme avantage de simuler les synergies, les compétitions et les technologies au sein des secteurs représentés avec un degré de finesse impossible à atteindre avec des modèles d'équilibre général, par exemple.

Nous montrons qu'une réduction de la capacité nucléaire se traduit mécaniquement par une augmentation de la contribution des autres sources d'énergie pour produire la quantité d'électricité requise. Parmi ces autres sources d'énergie, la biomasse est utilisée soit dans des unités dédiées, soit en co-combustion dans des centrales à charbon. Cette augmentation « mécanique » de la consommation de biomasse pour la production d'électricité liée à une baisse de la capacité nucléaire réduit le besoin de recours à des instruments économiques de type subvention pour stimuler l'utilisation de la biomasse afin d'atteindre les objectifs nationaux et européens en terme d'augmentation de la part des énergies renouvelables. Les unités de production d'électricité dédiées, c'est-à-dire n'utilisant que la biomasse, étant relativement plus sensibles aux subventions que les unités utilisant la biomasse en co-combustion, la réduction de la part du nucléaire peut alors, indirectement, favoriser la co-combustion. Or la co-combustion, si elle émet moins de GES que l'utilisation de charbon pur, en émet beaucoup plus que (1) les unités n'utilisant que la biomasse mais aussi (2) les centrales nucléaires. Ainsi, sous l'hypothèse d'un prix du carbone restant bas, nous montrons ici l'existence d'un effet contre-intuitif problématique : l'utilisation de biomasse bois en remplacement de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité peut entraîner une augmentation des émissions de GES. Néanmoins, les centrales utilisant la co-combustion étant sensibles au prix du carbone, cet effet pervers disparaît pour un prix du carbone suffisamment élevé. C'est d'ailleurs le scénario combinant une réduction du nucléaire et un prix du

---

<sup>17</sup> Loi n° 2015-992 du 17 août 2015.

carbone élevé qui permet d'atteindre l'objectif d'utilisation de biomasse au moindre coût, car il limite le niveau de la subvention requise et l'effet d'aubaine qui en découle.

Dans ce travail, nous soulevons en outre une autre question. On présente souvent le bois-énergie, et globalement tous les produits bois, comme neutres du point de vue des émissions de GES. Si cette affirmation est aujourd'hui largement débattue dans la littérature (*e.g.* Ter-Mikaelian, Colombo, et Chen, 2015), il s'agit de la pierre angulaire de toutes les stratégies bioéconomiques basées sur la biomasse forestière. En modélisant les non-linéarités dans les substitutions entre sources d'énergies, le travail présenté dans notre article montre que l'utilisation de bois pour la production d'énergie en substitution d'une autre source (ici l'énergie nucléaire) peut entraîner une augmentation des émissions de GES. Je souhaite ici insister sur l'importance de deux éléments. D'une part cette analyse est rendue possible par le couplage de deux modèles de simulation, intensifs en représentations des technologies et des comportements économiques. Il s'agit, typiquement, d'un résultat difficile, sinon impossible, à obtenir hors de ce cadre d'analyse. D'autre part, ce résultat est la preuve que la prise en compte du contexte économique et institutionnel est nécessaire et complémentaire à la représentation des technologies pour le calcul des émissions de GES des produits bois. Les études actuelles, qui se basent sur des Analyses de Cycle de Vie sectorielle, ignorent ou négligent trop souvent ce point. J'y reviens en détail dans la section 3.1 où je propose un cadre méthodologique pour le calcul des substitutions directes et indirectes de GES par les produits bois.

### 2.3. Thème 3 : adaptation du secteur forestier aux changements climatiques et à ses effets indirects

Gemene, Magnan et Tubiana (2010) notent que, face à des dérèglements climatiques qui sont à la fois ponctuels –avec des événements extrêmes peu prévisibles dont certains ne résultent que des effets de la variabilité climatique– et tendancielles, « mettre en œuvre » l'adaptation reste un univers de flou où la communauté scientifique internationale manque encore de recul. L'adaptation doit-elle être un mécanisme de continuité ou passer par des ruptures et certains abandons ? Les gestionnaires forestiers ont jusqu'ici misé sur la continuité. Choix logique pour un secteur où le court terme est de quelques années, le moyen terme de 50 ans et le long terme de 100 ans ou plus. Ce rapport au temps a toujours nécessité des acteurs de ce secteur d'accepter une part d'incertitude induite : les décisions prises aujourd'hui peuvent ne porter leurs fruits que dans plusieurs dizaines d'années. Aujourd'hui pourtant, ce rapport au temps est rattrapé par des événements climatiques dont personne n'avait anticipé l'intensité et la brutalité pour la France métropolitaine: sécheresses, canicules et invasions de pathogènes se multiplient et affectent de nombreux territoires et de nombreuses essences. La rupture, faute d'avoir été anticipée et voulue, s'impose d'elle-même à travers des dépérissements forestiers majeurs. Les acteurs de la filière cherchent à s'organiser en intégrant de nouvelles informations dans leur gestion et en activant ou réactivant des ressources locales sous-exploitées, et moins sensibles aux modifications du climat.

Si l'atténuation a pour objet la production décentralisée d'un bien collectif, l'adaptation relève principalement de la protection ou de la production de biens privés. Ceci a pour conséquence que les démarches d'adaptation sont le fait d'un grand nombre d'individus ou de collectifs, qui ne sont pas toujours coordonnés. Un premier corpus de travaux dans ce troisième axe de recherche vise à explorer certaines de ses démarches. J'étudie ici les services climatiques pour la sécheresse en forêt dans ([19] Caurla et Lobianco, 2020) et le comportement des gestionnaires forestiers face à l'invasion d'un pathogène dans ([17] Petucco, Lobianco et Caurla, 2020).

Par ailleurs, la question de l'évaluation des conséquences des démarches d'adaptation sur le secteur forestier est encore rarement abordée. C'est l'objet des deux autres travaux de cet axe de recherche. J'explore les conséquences économiques des plans de compensation après tempête dans ([9] Caurla,

Garcia, et Niedzwiedz, 2015) et les impacts de traitements alternatifs pour plusieurs pathogènes du pin maritime dans le massif des Landes dans ([13] Brunette et Caurla, 2016).

### *Quelle valeur économique pour les services climatiques en forêt ?*

Dans sa note éditoriale (« Editorial Brief » 2016), la jeune revue *Climate Services* donne une définition extensive des services climatiques (SC). Ceux-ci concernent la transformation des données relatives au climat –ainsi que d'autres informations pertinentes– en des produits tels que des projections, des prévisions, des informations, des tendances, des analyses économiques, des évaluations, des conseils sur l'élaboration de meilleures pratiques et l'évaluation de solutions et tout autre service en rapport avec le climat qui peut être utilisé pour la société dans son ensemble.

Dans le secteur forestier, ces services climatiques prennent la forme, par exemple, de conseils de gestion et de sélections d'essences et/ou de provenances. Ces produits finalisés sont souvent issus de programmes de recherche appliquée. Si le secteur forestier dans son ensemble reconnaît l'importance de la qualité de ces produits compte tenu des enjeux associés, leur valeur économique n'a, à ma connaissance, jamais fait l'objet de travaux de recherche. Pourtant, l'estimation de cette valeur est essentielle pour fournir aux institutions publiques et aux décideurs un instrument leur permettant de calibrer leurs investissements dans l'offre de SC pour le secteur forestier. Nous participons à combler cette lacune dans ([19] Caurla et Lobianco, 2020) en recherchant la valeur des SC dans le cas d'un risque sécheresse pour une forêt de pin maritime dans les Landes de Gascogne.

Pour les écosystèmes forestiers, une sécheresse entraîne à la fois une augmentation de la mortalité des arbres et une réduction de leur croissance. Ces effets sont décalés dans le temps, ils apparaissent généralement l'année suivant la sécheresse et durent plusieurs années. Un gestionnaire forestier ne peut (pour le moment, en tous cas) pas prévoir en avance la date et l'intensité d'une sécheresse, le SC ne porte donc pas sur ces deux aspects, que nous considérons dans ce travail comme totalement imprédictibles. En revanche, le délai entre l'observation de l'évènement climatique et ses conséquences<sup>18</sup> permet d'ajuster les pratiques de gestion forestière et, en particulier, de récolter prématurément un peuplement touché et de replanter un nouveau peuplement s'il est économiquement rentable de le faire. Ainsi, dans notre contribution, nous définissons le SC comme l'information portant sur l'intensité de la sécheresse et sur ses impacts en termes de réduction de croissance et d'augmentation de la mortalité des arbres. Cette information peut, par exemple, provenir d'un modèle éco-physiologique simulant les impacts d'une sécheresse en forêt. Nous supposons que cette information est fournie aux propriétaires forestiers juste après une sécheresse afin de les aider à décider de récolter prématurément ou de laisser le peuplement sur pied.

Pour connaître la valeur de cette information, nous comparons le *bénéfice actualisé en séquence infinie*, c'est-à-dire sur une infinité de révolutions forestières (BASI), d'un peuplement forestier avec et sans SC. Cet indicateur de gestion « historique » développé par Faustmann (Peyron et Maheut, 1999) présente l'avantage de pouvoir être utilisé pour comparer des itinéraires de gestion de longueurs différentes, ce qui fait particulièrement sens pour notre problème.

Notre analyse suggère que la valeur du SC dépend fortement de trois caractéristiques : (1) l'âge de la forêt soumise à la sécheresse ; (2) l'intensité de la sécheresse, tant en termes de mortalité que d'impact sur la croissance ; (3) la valeur du taux d'actualisation utilisé. Globalement, pour un taux d'actualisation de 2%, nous montrons que, pour un jeune peuplement (moins de 15-20 ans), la valeur du SC est assez faible et varie de 0 à 50 €/ha selon l'intensité de la sécheresse. En revanche, pour un peuplement mature, la valeur du SC augmente rapidement, jusqu'à un maximum l'année précédant la date optimale de récolte. Dans ce dernier cas, la valeur du SC peut atteindre un maximum de 4 900 €/ha pour une sécheresse intense (voir figure 7).

---

<sup>18</sup> Ce délai n'existe pas pour d'autres évènements climatiques, comme une tempête par exemple.

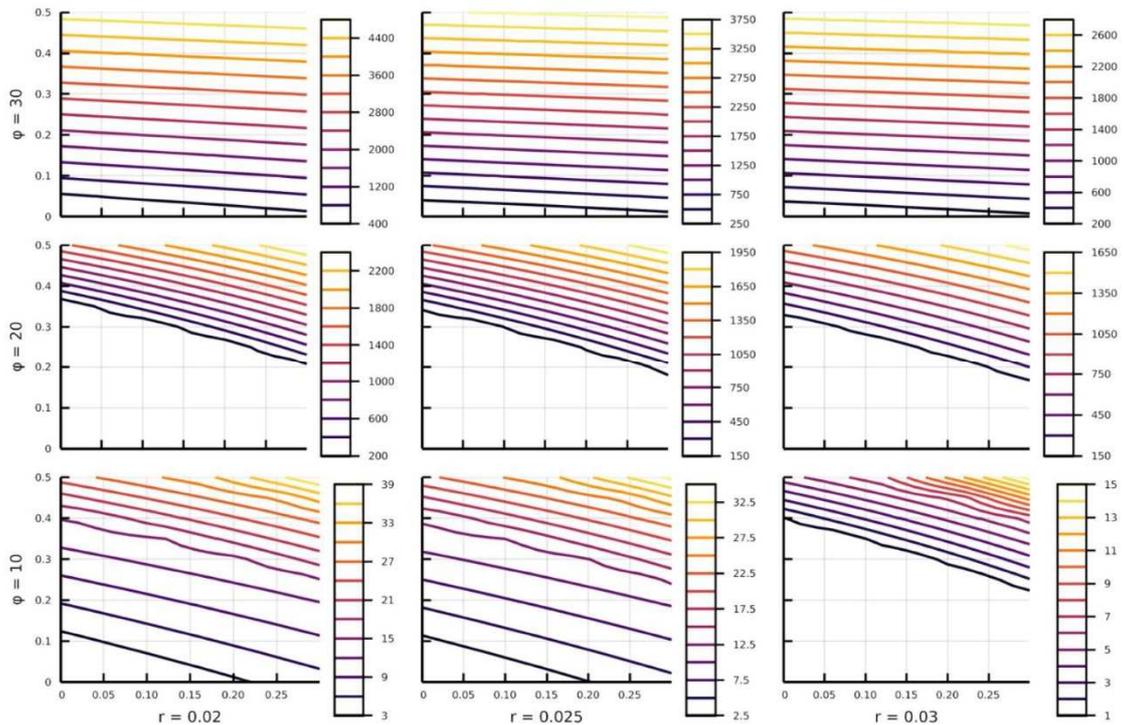


Figure 7 : valeurs du service climatique selon les différents paramètres de l'analyse. L'abscisse de chaque graphique  $[0-0,3]$  représente le taux de réduction de la croissance des arbres, l'ordonnée  $[0-0,5]$  représente le taux additionnel de mortalité.  $\Phi$  est l'âge auquel le peuplement est touché (en année) et  $r$  est le taux d'actualisation. Les courbes de niveaux colorées sont les valeurs des services climatiques en €/ha. Source : ([19] Caurla et Lobianco 2020)

L'intérêt de ce travail repose moins sur les valeurs précises calculées que sur le développement de la méthode, et la preuve de concept apportée. Il montre que les SC ont une valeur économique, et que celle-ci peut-être importante. Cette méthode peut servir de base à de nombreux développements, qu'ils soient d'ordre théorique, comme la prise en compte de la dynamique des prix et des taux d'intérêt dans le modèle, ou méthodologique, comme le couplage avec des modèles éco-physiologiques afin de modéliser la réduction de croissance et l'augmentation de mortalité.

### ***Adaptation des gestionnaires forestiers à une invasion de pathogènes et impacts économiques sur le secteur forestier***

Deux composantes de l'adaptation sont identifiées et ont été explorées dans la littérature (Gemenne, Magnan, et Tubiana, 2010; Godard, 2010). Il s'agit d'une part de l'adaptation anticipative dont l'objectif est de penser les changements à mettre en œuvre en amont, souvent plusieurs années avant que le risque ne devienne tangible, et l'adaptation réactive, parfois assimilée à la résilience (Gemenne, Magnan, et Tubiana, 2010), qui fait référence aux mesures mises en place en réaction à des événements dont l'occurrence précise dans le temps n'était pas connue en amont. Nous explorons ici ces deux dimensions dans le cas de l'adaptation à l'invasion de pathogènes. Ainsi, dans ([13] Brunette et Caurla, 2016), nous développons une méthodologie pour l'analyse anticipatoire des choix d'adaptation et, dans ([17] Petucco, Lobianco, et Caurla, 2020), nous développons une infrastructure de modélisation pour l'étude de la dimension réactive de l'adaptation.

Si les sécheresses constituent des conséquences directes des changements climatiques, les invasions de pathogènes en sont souvent des impacts indirects<sup>19</sup>. L'évaluation des impacts économiques d'un pathogène présente plusieurs difficultés. Par son caractère temporellement dynamique, la diffusion d'un pathogène ne réduit pas seulement la disponibilité immédiate des essences affectées, mais modifie également leur disponibilité future ainsi que toute la structure des forêts touchées, tant en terme de

<sup>19</sup> D'autres origines à l'émergence de pathogènes existent, comme l'intensification des échanges commerciaux.

composition d'essence que de répartition des classes d'âge. Outre ces dynamiques écologiques, les marchés du bois réagissent également à la diffusion du pathogène. Les chocs sur la disponibilité des ressources ont de fortes chances de modifier les prix de marché et, à terme, les choix de production et de consommation. En particulier, les gestionnaires forestiers sont susceptibles d'anticiper les impacts de la diffusion d'un pathogène et d'orienter leurs préférences en faveur d'essences non touchées, ce qui réduit d'autant plus, et à long terme, la présence des essences attaquées dans le paysage forestier. Enfin, l'invasion de pathogènes n'est pas seulement un problème dynamique, c'est aussi un problème spatial dont les conséquences sanitaires et économiques ne se limitent pas aux zones directement affectées.

Il existe une littérature assez abondante qui explore la question des coûts d'une invasion de pathogènes en forêt à l'aide de modèles bioéconomiques (e.g. Yemshanov et al., 2009; Kovacs et al., 2010). Mais, bien que ces études soient capables de représenter la propagation d'un pathogène à grande échelle, la dynamique des forêts et les impacts économiques dans la filière n'ont jamais intégré les réponses des gestionnaires forestiers en termes d'adaptation en tenant compte de leurs anticipations à moyen et long termes. Notre démarche dans ([17] Petucco, Lobianco, et Cauria, 2020) est précisément de combler cette lacune. Nous l'appliquons au cas de la chalarose du frêne (*Chalara fraxinea*) une maladie fongique originaire d'Asie du sud-est, dont les modalités d'introduction en Europe sont toujours inconnues et qui se diffuse depuis la Pologne vers l'ouest du continent. Afin d'évaluer les impacts de cette diffusion et modéliser l'adaptation « réactive » des gestionnaires forestiers à cette diffusion, nous couplons le modèle FFSSM++ avec un modèle écologique de propagation de la chalarose (figure 8) et nous simulons les impacts économiques et la dynamique de la ressource jusqu'à 2060<sup>20</sup>.

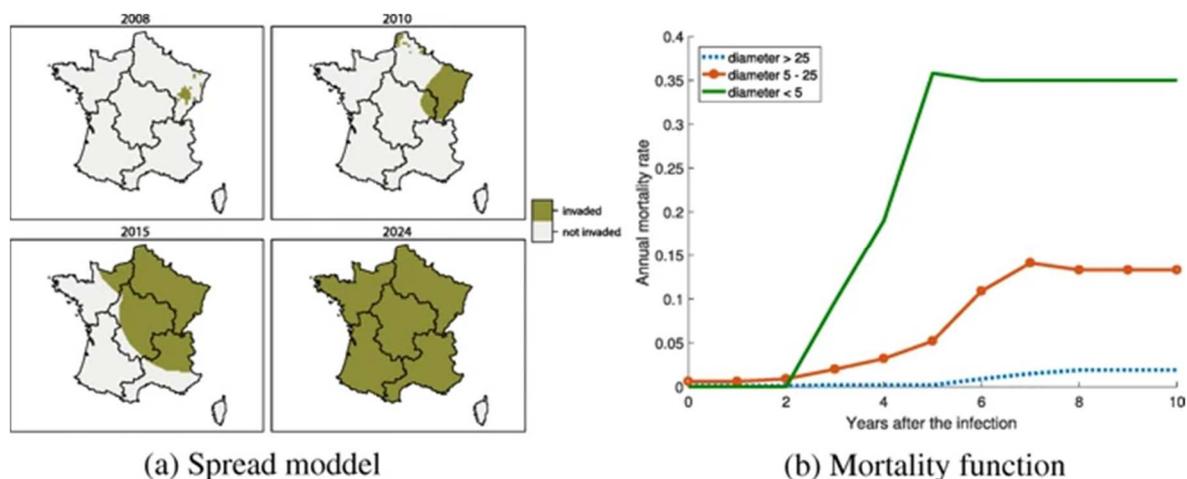


Figure 8: modèle de propagation de la chalarose du frêne et fonctions de mortalité selon la taille des frênes. Source : ([17] Petucco, Lobianco, et Cauria 2020).

Les simulations montrent que l'offre de bois de frêne diminue sur tout le territoire métropolitain à l'horizon 2060, avec des effets dynamiques spatiaux intéressants : les régions touchées en dernier (comme le Sud-Est) bénéficient dans un premier temps de leur statut de région relativement épargnée et voient leur récolte de bois de frêne augmenter afin de compenser la baisse de production dans les régions précocement touchées. Surtout, les résultats montrent que les gestionnaires forestiers s'adaptent à la diffusion du pathogène en favorisant d'autres essences lors du choix de régénération en forêt, les revenus espérés liés à l'exploitation du frêne chutant drastiquement à long terme (voir figure 9). Ainsi, outre la mortalité induite par le pathogène, nous montrons que les décisions de gestion qui tiennent compte de l'anticipation de cette mortalité et de ses conséquences économiques intensifient la réduction globale des surfaces occupées par le frêne en forêt. Au niveau national « l'effet d'adaptation », c'est-à-dire la réduction des volumes de bois en forêt induite par les choix de régénération des gestionnaires, représente

<sup>20</sup> Nous limitons arbitrairement la simulation à 2060, que nous considérons comme un horizon suffisamment long pour saisir les principales conséquences de l'invasion.

en moyenne 4 à 7 % de la réduction totale du volume sur l'horizon de simulation, et jusqu'à 10% dans certaines macrorégions comme le Nord-Est.

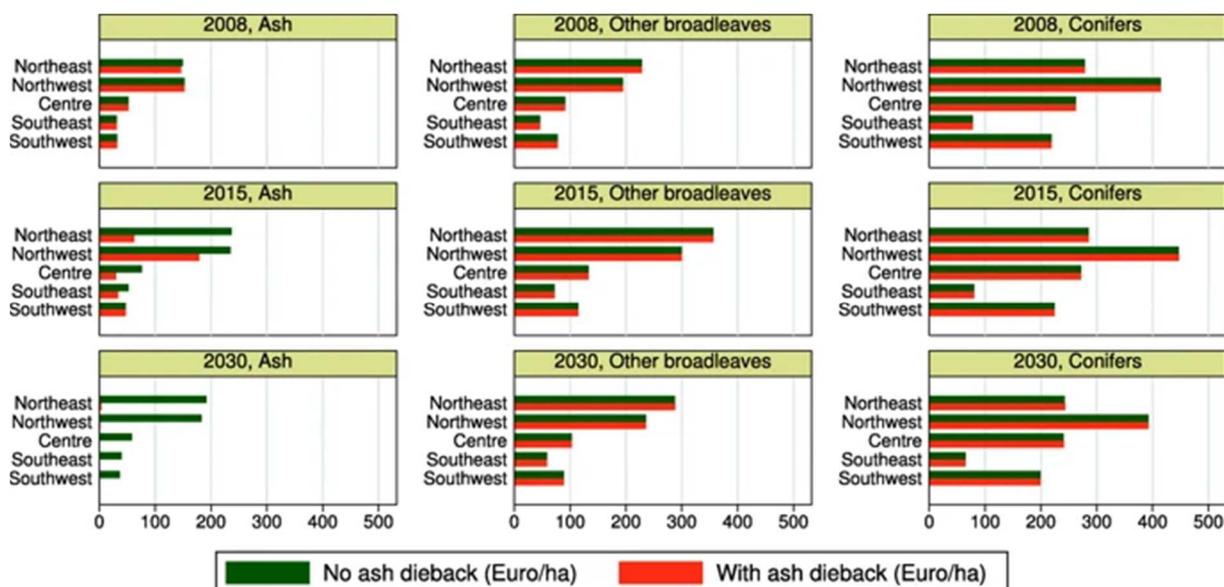


Figure 9: comparaison pour chaque macrorégion des revenus espérés pour différents types de forêts en 2008 (au-dessus), 2015 (milieu) et 2030 (au-dessous), avec et sans dépérissement du frêne (« ash » en anglais). Source : ([17] Petucco, Lobianco, et Caurla 2020).

Ce travail montre que, lorsqu'aucune mesure de prévention n'est appliquée, l'arrivée d'un pathogène induit une modification des comportements des gestionnaires en forêt se traduisant, à long terme, par une modification des paysages forestiers. Mais si nous montrons que le comportement du gestionnaire est susceptible de changer en réaction à l'arrivée du pathogène, il peut aussi gagner à changer en prévention de celle-ci.

Nous analysons cette dimension préventive dans ([13] Brunette et Caurla, 2016) où nous développons un modèle simple basé sur la comparaison des *bénéfices actualisés en séquence infinie* (BASI) pour un peuplement pur de pin maritime dans les Landes de Gascogne. Nous utilisons ce modèle pour comparer plusieurs mesures de prévention des risques liés à la diffusion de pathogènes en forêt. Nous analysons deux agents pathogènes affectant ou susceptibles d'affecter la forêt des Landes : un charançon (*Hylobius abietis*) et un champignon (*Heterobasidion annosum*). *Hylobius abietis* est le charançon le plus commun dans les plantations de conifères tandis que *Heterobasidion annosum* (« fomes ») est un champignon racinaire responsable d'importants dégâts sur les pins maritimes de la forêt des Landes de Gascogne (Piou et Jactel, 2010). Selon Hodges (1999), le fomes est considéré comme le champignon forestier causant le plus de perte économique dans l'hémisphère nord et, rien qu'en Europe, il est responsable de la perte de 800 millions d'euros par an.

Ces deux pathogènes soulèvent d'importantes préoccupations économiques dans cette région, et l'évaluation des coûts et des pertes économiques qu'ils entraînent - ainsi que des coûts des mesures de gestion des risques - devient une condition préalable à l'amélioration du processus décisionnel des propriétaires forestiers privés. Dans ce cadre, notre contribution montre que les traitements classiques ne sont pas toujours plus performants que l'absence de traitement ou l'utilisation de traitements alternatifs. En particulier, nous montrons que l'élimination locale des souches et leur destruction, même si elle est très coûteuse, est plus rentable que les solutions Polybor© et Rotstop© pour lutter contre *Heterobasidion annosum*. Néanmoins, la solution de cyperméthrine reste l'option la plus pertinente sur le plan économique pour prévenir *Hylobius abietis*. Dans tous les cas, le recours à une jachère de 5 ans après contamination d'un peuplement et exploitation de ses bois présente des résultats économiques très satisfaisants, la jachère ne présentant pas d'autre coût que le temps d'immobilisation des sols. En outre,

même si nous ne les analysons pas dans notre étude, une jachère est susceptible de fournir des co-bénéfices intéressants, en terme de biodiversité par exemple.

### ***Comparer les impacts de plans de compensations post-crise alternatifs***

Si le délai entre occurrence de l'évènement et conséquences sur le peuplement dans le cas d'une sécheresse ou d'une invasion de pathogène permettent, dans une certaine mesure, une gestion « anticipative », le caractère soudain et imprévisible d'une tempête laisse le gestionnaire forestier sans marge de manœuvre *ex ante*. Il s'agit alors, pour la gestion forestière et, plus généralement, pour le secteur forêt-bois de reconstruire le capital productif et de limiter au maximum les conséquences de l'accroissement imprévu de l'offre de bois sur le marché, notamment la baisse des cours du bois. Plusieurs solutions s'offrent aux Etats pour cela : subventionner le stockage des bois ou, au contraire, favoriser leur transport sur de longues distances, fournir des aides à la replantation ou des prêts à taux avantageux.

Lors de la tempête Klaus qui, en 2009, a détruit plus de 42 Mm<sup>3</sup> de bois dans le sud-ouest de la France, un plan de compensation de 138,5 M€ a été débloqué par le Gouvernement français. Ce plan a pris la forme de prêts à taux bonifié (12,5 M€), de subventions aux zones de stockage (25 M€), de subventions au transport (56 M€) et de subventions au transbordement (46 M€) (Bavard, de Lagarde, et Magrum, 2013). Ce plan a été formulé dans les six semaines suivant la tempête, avant d'être approuvé par la Commission Européenne le 3 juin 2009. De nombreuses critiques ont été formulées par certaines parties prenantes concernant le poids relatif des subventions allouées au transport et au stockage. Certaines de ces critiques ont notamment reproché au plan d'être trop favorable au transport et d'entraîner des fuites de subventions au profit des industries de transformation étrangères. Le travail que nous avons mené dans ([9] Caurla, Garcia, et Niedzwiedz, 2015) se positionne comme une tentative d'objectivation de ce débat en abordant la question non pas depuis l'angle du comportement du gestionnaire forestier face aux incitations mais depuis l'angle des impacts méso-économiques des plans de compensation sur la filière, en particulier les impacts sur les surplus des agents économiques, sur les déficits de la balance commerciale et sur la dynamique des prix du bois.

Nous avons pour cela utilisé la version 1.0 du modèle FFSM et nous y avons rajouté un module permettant de représenter le volume de bois détruit par la tempête et le stockage. Quatre groupes de scénarios ont été testés pour simuler d'une part le plan de compensation tel qu'il a été mis en place, d'autre part un scénario « baseline » (sans plan, donc non observé) et, enfin, deux scénarios avec plans de compensation alternatifs : un scénario avec réallocation d'une partie des montants du plan vers le stockage et un autre avec réallocation d'une partie des montants vers le transport. Si nos résultats montrent que le plan de compensation a bien accéléré l'offre de chablis (+ 14 % par rapport à la baseline « sans plan »), il a également largement favorisé le stockage sur place et l'exportation à l'étranger. Par ailleurs, nous montrons que la baisse des prix consécutive à la tempête est limitée lorsque la proportion de stockage augmente. Cependant, le retour des prix « à la normale » est alors également retardé. L'acceptabilité sociale des plans dépend fortement du compromis entre ces deux impacts.

Du point de vue du gain social net, une analyse de surplus montre que le plan a été bénéfique pour le secteur forestier. La somme actualisée des gains de surplus lié au plan de compensation sur la période 2009-2020 correspond à 44 M€. La réaffectation d'une partie des subventions au transport vers le stockage augmenterait le gain total actualisé du surplus économique (+70 % pour une réaffectation de 20 M€ de subventions au transport vers le stockage), alors que la réaffectation de 20 M€ de subventions au stockage vers le transport diminuerait le gain total actualisé de 57 %. Cet impact global montre clairement que le secteur forestier national bénéficie relativement plus des aides au stockage lors d'un évènement de ce type.

Si ces résultats peuvent apporter une certaine rationalité aux futures négociations en vue d'éventuelles catastrophes à venir, il est important de les placer dans le contexte très spécifique de la forêt de pins

maritimes dans le sud-ouest de la France. En effet, dans cette région, l'industrie forestière existante est suffisamment forte et organisée pour articuler l'amont et l'aval du secteur forestier lorsqu'une catastrophe naturelle se produit. En outre, l'utilisation des zones de stockage existantes (créées après les tempêtes Lothar et Martin en 1999) a permis de réduire considérablement les coûts de création de nouvelles zones de stockage. À l'inverse, dans d'autres régions dépourvues d'industries de transformation des produits forestiers ou de zones de stockage, l'exportation peut être une meilleure solution.

#### 2.4. Thème 4 : régionalisation des activités dans le secteur forestier et durabilité

Depuis les années 1990, de nouvelles rhétoriques émergent, prônant d'une part le rôle du secteur forestier dans le développement durable des sociétés et, d'autre part, la relocalisation ou l'ancrage des entreprises du secteur forestier dans les territoires, notamment les territoires ruraux. Les milieux forestiers sont ainsi plébiscités en tant que pourvoyeur de bois, matériau perçu comme « écologique », comme fournisseurs d'habitats pour la biodiversité et également, plus récemment, en tant que fournisseurs de services écosystémiques. Sur l'autre versant, la relocalisation des activités de la filière bois devient la composante essentielle d'un développement territorial qui cherche à mettre en avant les notions de proximité et de circularité au service de sa durabilité.

La montée en puissance de ces processus couplés d'écologisation et de territorialisation a été progressive dans la filière forêt-bois. D'un côté, les questions de durabilité sont de plus en plus prégnantes et ne sont plus uniquement poussées par la rationalisation dans l'utilisation des ressources comme dans la règle d'Hotelling ou par l'optimisation de la gestion comme dans la règle de Faustmann. Les attentes se sont aussi déplacées du côté de la demande et du consommateur par le développement d'attitudes de consommation responsables, conduisant par exemple à la mise en place de circuits courts comme dans le secteur agricole (e.g. « AMAP<sup>21</sup> » de bois-énergie) et de pratiques présentées comme plus vertueuses d'un point de vue environnemental. De l'autre côté, comme nous le montrons dans ([21] Lenglet et Caurla, 2020), « l'émergence d'innovations durables entre acteurs publics et privés, formalisant un lien entre filière et territoire, débouchent sur la mise en place de modèles alternatifs de développement sur des modes soit ascendants soit descendants dont les modalités opérationnelles sont déléguées au niveau territorial ». Sur un plan opérationnel, cela « prend la forme de la promotion et la mise en place de clusters et de pôles de compétitivité au niveau régional, réunissant régulièrement secteurs public et privé ».

Néanmoins, si aujourd'hui la reconquête du matériau bois à la fois dans les discours politiques et dans les campagnes de promotion nationales permettent aux acteurs industriels et territoriaux de légitimer de nombreuses actions locales de développement économique sur une base argumentaire écologique, il n'en reste pas moins nécessaire d'évaluer la durabilité de ce développement local sur une base objective. Pour cela, des éléments essentiels à la compréhension du fonctionnement de la filière restent aujourd'hui absents ou sous-développés, comme par exemple l'information sur les flux environnementaux et économiques, peu ou pas disponibles au niveau (infra-)régional. D'une manière générale, les outils existants pour l'évaluation de la durabilité des pratiques à ces échelles sont encore au stade embryonnaire et mon quatrième axe de recherche propose des travaux qui s'inscrivent dans ce développement précoce. Dans ce cadre, je présente une revue de littérature sur les couplages entre modèles économiques et outils d'évaluation environnementale pour l'évaluation de la durabilité aux échelles régionales/territoriales ([16] Beaussier et al., 2019) puis une application pratique combinant le modèle FFSSM et l'Analyse de Flux de Matière (AFM) ([14] Lenglet, Courtonne, et Caurla, 2017). Enfin, je présente un travail empirique cherchant à évaluer les déterminants des coupes de bois à l'échelle de la France, et notamment les déterminants économiques pour projeter les stocks futurs et évaluer la durabilité de la récolte en forêt à long terme ([18] Fortin et al., 2019).

---

<sup>21</sup> Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne.

## *Quels outils pour l'évaluation économique et environnementale de la durabilité des pratiques à l'échelle du territoire ?*

De nombreuses pratiques d'aménagement du territoire s'inscrivent dans une démarche de développement durable. Dans le secteur forestier, ces pratiques concernent par exemple la conservation des habitats et l'aménagement des paysages (mise en place de trames vertes et bleues, espaces naturels sensibles, réserves naturelles, schémas de paysages, etc.), l'utilisation raisonnée des ressources spatiales (schémas d'urbanisme) et des ressources énergétiques avec le développement des énergies renouvelables, les démarches « plans climat » et la stimulation de l'économie locale comme les plans de soutien à l'écoconstruction ou aux circuits courts à travers la mise en place de marques (*e.g.* sélection Vosges pour les sciages résineux) ou l'aide aux infrastructures de transport.

Si elles s'inscrivent toutes *a priori* dans une démarche durable et vertueuse, il n'est pas toujours évident d'évaluer les impacts réels de ces initiatives sur l'économie et sur l'environnement. Par exemple il est attendu de la mise en place d'une chaufferie au bois qu'elle ait des impacts positifs en terme d'émissions de gaz à effet de serre si le bois remplace des énergies non renouvelables. Mais, dans le même temps, les autres impacts environnementaux sont plus incertains. On peut ainsi se questionner sur l'impact de la récolte additionnelle de bois sur les autres services écosystémiques en forêt, celui de son transport en terme de pollution de l'air et celui de sa combustion sur l'émission de particules fines. Par ailleurs, un tel aménagement a des conséquences économiques incertaines : on peut raisonnablement faire l'hypothèse que des emplois vont être créés par la construction et le fonctionnement de la chaufferie mais que, par ailleurs, l'utilisation accrue de bois pour la génération d'énergie va conduire à une augmentation des prix des produits bois, et donc possiblement conduire à une compétition avec d'autres industries.

Un niveau supplémentaire d'incertitude apparaît lorsqu'on cherche à étudier les impacts à différentes échelles. En reprenant notre exemple, l'impact environnemental de la chaufferie peut être globalement négatif à une échelle très locale, pour laquelle la baisse d'émissions de gaz à effet de serre induite par la chaufferie n'a qu'un impact positif indirect très faible alors que les émissions de particules fines peuvent entraîner des problèmes significatifs à cette échelle. A une échelle plus large en revanche, par exemple régionale ou nationale, les problèmes de pollution de l'air aux particules fines deviennent anecdotiques. Pour les impacts économiques, des arbitrages similaires apparaissent. A l'échelle locale, l'effet peut être positif, via par exemple l'augmentation des prix des produits et donc des revenus des propriétaires forestiers ou les effets positifs sur le taux d'emploi. Mais à des échelles plus larges, les impacts sont plus incertains : il est par exemple possible qu'une partie du bois consommé dans la chaufferie soit importé, avec des effets indirects de compétition avec d'autres usages du bois dans les régions exportatrices.

Modéliser simultanément ces impacts économiques et environnementaux à de multiples échelles avec des outils de recherche intégrés est encore à ce jour une démarche peu répandue. Une critique récurrente des outils disponibles tient en leur difficulté à tenir compte des comportements économiques non-linéaires. Cette difficulté est partiellement surmontée grâce au développement de couplages entre les modèles des sciences économiques et les outils issus des sciences de l'environnement pour l'étude des dynamiques à l'échelle des territoires. L'objectif de notre travail dans ([16] Beaussier et al., 2019) est de faire une revue des couplages existants afin de pointer leurs avantages et inconvénients.

Dans les faits, nous avons identifié plusieurs « familles » de modèles intégrés économie-environnement (EEIM en anglais pour « Economic-Environmental Integrated Models »). Pour constituer ces familles, nous avons distingué plusieurs groupes de modèles économiques et plusieurs méthodes d'évaluation environnementale, puis nous les avons « croisés ». Cinq groupes de modèles économiques ont ainsi été identifiés : les modèles input-output (IO), les modèles d'équilibre général (CGE), les modèles d'équilibre partiel (PE), les modèles de dynamique des systèmes (SD) et les modèles multi-agents (ABM). Ces modèles diffèrent par bien des aspects, par exemple par le nombre de secteurs économiques qu'ils représentent, la diversité des indicateurs économiques qu'ils permettent de calculer, leur facilité de mise en œuvre, etc. A titre d'exemple, un modèle d'équilibre général est capable de calculer

l'évolution des prix dans plusieurs secteurs économiques et l'impact d'une politique ou d'un aménagement sur le taux d'emploi mais sera difficile à mettre en œuvre au niveau régional car gourmand en données et en estimations économiques préalables. D'un autre côté, la revue de littérature a porté sur trois groupes de méthodes d'évaluation environnementale : l'Analyse de Cycle de Vie (LCA), l'Analyse de Flux de Matière (MFA) et les empreintes environnementales (FP). Ces méthodes diffèrent là aussi par le nombre d'impacts environnementaux considérés (effet de serre, pollution de l'air, de l'eau, usages des terres, etc.), leur facilité de mise en œuvre ou leur capacité à tenir compte des impacts environnementaux sur toute la durée de vie d'un produit. Ainsi, par exemple, l'analyse de cycle de vie est la méthode la plus exhaustive quant aux impacts considérés mais l'analyse de flux de matière est plus performante pour le suivi des impacts à des échelles très locales.

L'évaluation de ces EEIM est ensuite réalisée sur la base de plusieurs critères parmi lesquels le niveau d'agrégation, le nombre d'indicateurs étudiés, la capacité des EEIM à tenir compte des effets indirects, les échelles spatiales et temporelles considérées et la facilité d'utilisation. Globalement, le travail montre que les couplages entre PE/CGE et FP/LCA ressortent comme les couplages les plus performants pour l'ensemble de ces critères. Néanmoins aucun EEIM n'obtient le score maximal pour tous les critères à la fois (voir figure 10). Chacun présente des forces et des faiblesses et est adapté pour répondre à des questions différentes. En outre, presque tous les couplages analysés relèvent du « soft-coupling », ce qui pose la question de leur capacité à traiter de problématiques de durabilité forte, pour lesquelles des contraintes fortes sur les états environnementaux sont susceptibles d'induire des rétroactions majeures sur la répartition des activités économiques.

	IO			CGE			PE			ABM			SD		
	IO - FP	IO - LCA	IO - MFA	CGE - FP	CGE - LCA	CGE - MFA	PE - FP	PE - LCA	PE - MFA	ABM - FP	ABM - LCA	ABM - MFA	SD - FP	SD - LCA	SD - MFA
Désagrégation	4	4	3	3	3	2	3	3	3	1	1	2	2	1	2
Analyse multicritères	2	2	1	3	4	3	2	3	2	2	3	2	2	3	2
Effets off-site et consécutifs	2	2	1	3	4	3	2	3	2	2	3	3	2	3	3
Echelle et spatialisation	3	2	1	3	2	1	4	3	2	3	2	1	3	1	2
Temporalité	1	2	1	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4
Facilité d'utilisation	4	4	4	2	2	2	3	3	3	2	1	1	2	2	2

Figure 10: performance des couplages selon 6 critères d'analyse (1= peu performant/4=très performant). IO : input-output ; CGE : équilibre général calculable ; PE : équilibre partiel ; ABM : modèles multi-agents ; SD : modèle de dynamique des systèmes ; FP : empreintes environnementale ; LCA : analyse de cycle de vie ; MFA : analyse de flux de matière. Source : ([16] Beaussier et al. 2019).

Ce travail constitue la première brique de la thèse de Thomas Beaussier, que je co-encadre avec Eléonore Loiseau et Véronique Bellon-Maurel de l'UMR ITAP et Philippe Delacote du BETA. Les deux autres articles<sup>22</sup> de la thèse de Thomas Beaussier partent de ces conclusions pour mettre en œuvre un couplage entre le modèle FFSM et l'Analyse de Cycle de Vie. Ce couplage permet de définir un indicateur d'éco-efficience régionalisé qui synthétise les impacts économiques et environnementaux d'une mesure politique ou réglementaire sous la forme d'un indicateur agrégé. Dans ce cadre, les résultats préliminaires montrent qu'une subvention au bois-énergie augmente l'éco-efficience du secteur forestier quelles que soient les catégories d'impacts (ressources, écosystèmes, santé) et quelle que soit l'échelle à laquelle la subvention est mise en place (régionale ou nationale).

<sup>22</sup> Articles en cours de publication.

## *Couplage entre FFSM et l'Analyse de Flux de Matière (MFA) pour l'analyse « conséquentielle » des flux de bois dans le secteur forestier*

En France, la surface forestière s'étend<sup>23</sup>. En 2016, les forêts et les surfaces boisées couvraient plus d'un tiers du territoire national, faisant de la France le quatrième pays le plus boisé d'Europe. Le volume actuel de bois dans les peuplements forestiers est estimé à 2,6 milliards de m<sup>3</sup> et représente une ressource potentielle importante pour les industries du bois. Pourtant, le bilan économique du secteur bois reste relativement modeste et, surtout, il présente toujours un important déficit de sa balance commerciale<sup>24</sup>. La relocalisation des activités des scieries sur le territoire national est de plus en plus présentée comme une solution pour assurer l'approvisionnement en produits de sciage tout en réduisant le déficit commercial (Alexandre, 2017). Cependant cela questionne : quel segment du secteur relocaliser ? A l'aide de quel(s) instrument(s) économique(s) ? Et quelles seraient les conséquences sur le reste du secteur, en termes de concurrence, d'arbitrages et/ou de synergies ? Pour répondre à ces différents niveaux de questionnement nous construisons dans ([14] Lenglet, Courtonne, et Caurla, 2017) une structure de modélisation hybride, capable de représenter les flux dans le secteur forestier, les interactions entre les différentes filières au sein du secteur et les rétroactions économiques induites par des instruments de relocalisation. Nous proposons pour cela de coupler une MFA avec FFSM 1.0.

Construire une MFA de la filière bois présente de nombreuses difficultés. Le manque de données et d'informations régionalisées sur les flux de matière première et de produits bois transformés est régulièrement pointé par les pouvoirs publics mais aussi par les acteurs de la filière eux-mêmes. Cette situation *a priori* paradoxale (les échanges entre acteurs sont générateurs de ces flux) met plus largement en évidence la difficulté de compilation et de réconciliation de données de sources hétérogènes à des échelles infrarégionales dans le secteur forêt-bois. En particulier, différentes unités sont utilisées dans les rapports officiels (« mètres cubes équivalent bois rond », « mètres cubes produit », « tonnes », « nombre d'unités produites »), ce qui rend difficile le recouplement des données. En outre, de grandes incertitudes prévalent dans certaines bases de données existantes, notamment en ce qui concerne le bois énergie. Afin de pallier ces trois difficultés (absence d'unité commune, manque de données et incertitudes fortes sur certaines données) nous convertissons l'ensemble des données recueillies en une nouvelle unité, le « mètre cube équivalent bois fibre » décrite dans la littérature par (Bösch et al., 2015) et nous construisons un algorithme de réconciliation des données en nous basant sur (Courtonne et al., 2015). Conceptuellement, la réconciliation des données consiste à utiliser toutes les données disponibles et les informations sur la qualité de ces données pour estimer les données manquantes. Techniquement, cela prend la forme d'une minimisation des écarts entre données observées et données calculées sous quatre contraintes : la conservation de la masse pour chaque produit, la conservation de la masse pour chaque segment du secteur forêt-bois à l'exception de la production biologique des forêts, les termes positifs ou nuls et la majorité des termes égale à zéro. La minimisation est réitérée 1000 fois via des simulations de Monte-Carlo ce qui permet d'obtenir une estimation ainsi qu'un intervalle de confiance pour chaque variable. Cette information nous permet de savoir quel flux a été réajusté avec le plus de fiabilité.

La MFA qui en résulte est présentée sous la forme de diagramme de Sankey dont un exemple est donné sur la figure 11 pour les flux dans les industries de la première transformation au niveau national. Les résultats suggèrent que si les feuillus dominent les conifères dans les forêts françaises, la production de bois feuillus est trois fois inférieure à celle de bois résineux. Les exportations représentent 22% de la production totale de grumes feuillues, mais seulement 7% de la production de grumes résineuses. Cela conduit à un paradoxe apparent : la ressource est abondante et potentiellement sous-exploitée, mais le secteur n'est pas rentable puisqu'une partie de la valeur ajoutée est créée à l'étranger. Cependant, tant

<sup>23</sup> La forêt a doublé de surface depuis 1830 et cette expansion s'est poursuivie au rythme très soutenu de 0,7% par an en moyenne depuis 1985 (Denardou, 2018).

<sup>24</sup> En 2017, ce déficit était de l'ordre de 5,4 milliards d'euros (<https://www.fcba.fr/content/competitivite-internationale-industrie-du-bois>)

que la demande internationale de grumes (surtout feuillue) sera le moteur des exportations, la production de bois feuillu sera orientée vers l'exportation et les investissements dans le secteur seront différés, aggravant d'autant plus le déficit de la balance commerciale. Nous explorons cet enjeu dans la deuxième partie de ce travail en testant trois instruments économiques pour réduire les exportations de grumes à l'aide de FFSM : une subvention aux consommateurs de produits bois, une subvention aux industries de transformation et un surcoût à l'exportation, que nous justifions par le coût induit par des contrôles sanitaires et qui agit comme un « *export ban* » dans le modèle.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'instrument optimal. La subvention à la consommation induit les gains de surplus les plus élevés dans le secteur mais est très coûteuse, en raison des effets d'aubaine importants. La subvention à la transformation est préférable car moins coûteuse et comparable en terme de gains de surplus. Si on fait l'hypothèse que les coûts de transaction et de fonctionnement sont inclus dans le prix des produits exportés, « *l'export ban* » est la politique la moins coûteuse mais ne profite pas, directement et à court terme tout du moins, au secteur bois.

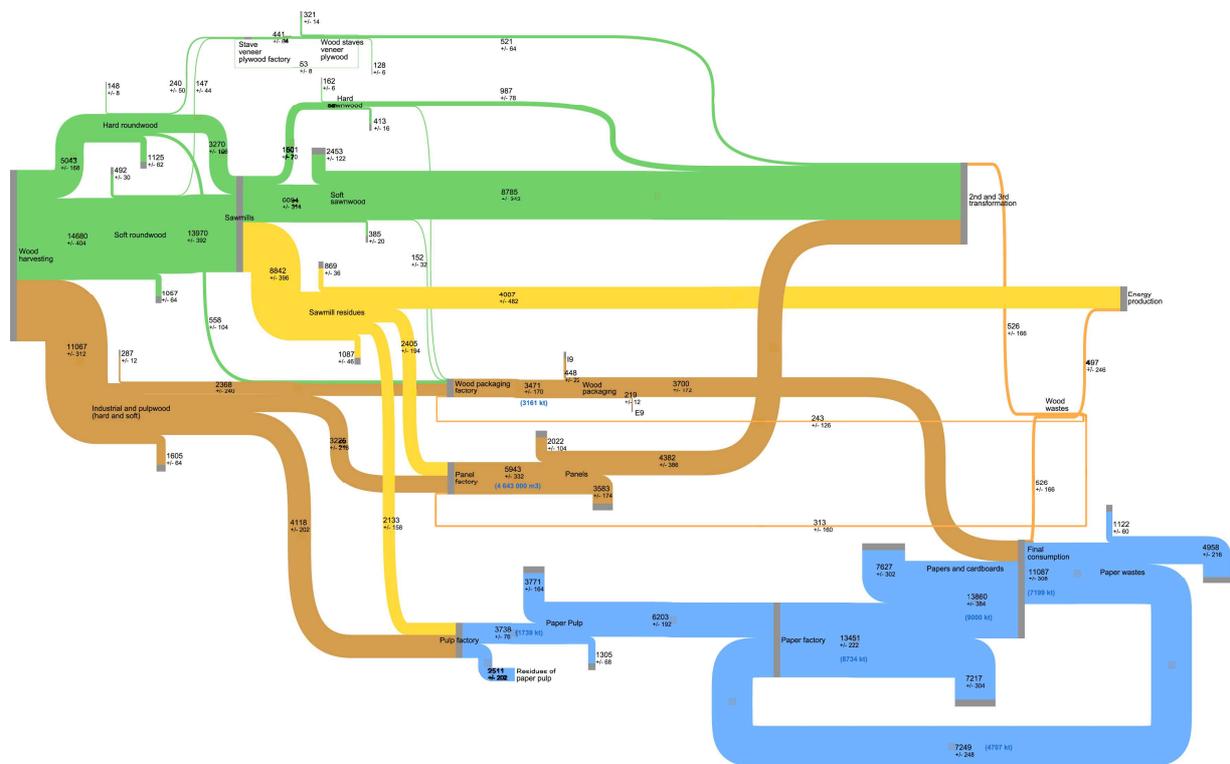


Figure 11 : diagramme de Sankey présentant les flux dans les industries de première transformation du secteur forêt-bois au niveau national. Les flux horizontaux sont les flux domestiques, les flux verticaux entrant par le haut sont les importations depuis l'étranger et les flux verticaux sortant par le bas sont les exportations. Les flux circulaires représentent le recyclage. Source : ([14] Lenglet, Courtonne, et Caula 2017).

### Déterminants des coupes de bois et projection régionalisée des stocks de bois à large échelle : une récolte durable ?

La MFA présentée ci-dessus confirme qu'une grande partie de la production biologique dans les forêts françaises, notamment la biomasse feuillue, n'est pas exploitée. Comprendre pourquoi une ressource forestière est exploitée ou pas est une question qui a largement été traitée par les sciences économiques dans le cas des propriétaires forestiers privés non industriels, y compris pour le cas de la France (Garcia, Kere, et Stenger, 2014; Brunette, Foncel, et Kéré, 2017; Petucco, Abildtrup, et Stenger, 2015). Les études menées se basent sur des enquêtes et identifient plusieurs variables qui influencent la décision de récolte : l'âge et le revenu des propriétaires, la taille de la propriété, l'aversion au risque ou les

préférences pour les aménités forestières. Si ces études sont utiles dans une optique de développement d'outils incitatifs pour l'offre des propriétaires non industriels, elles s'appliquent mal au cas d'une région ou d'un territoire où coexistent plusieurs types de propriétaires (publics, privés, collectivités) et plusieurs contextes biophysiques (diversité d'essences objectifs, de densités forestières, ou variabilité de la topographie). Dans ([18] Fortin et al. 2019), nous proposons de combler cette lacune en estimant un « modèle de récolte » régional puis en intégrant ce modèle de récolte à un modèle individuel de croissance des arbres afin de projeter le stock de bois sur pied à une échelle régionale, selon plusieurs scénarios prospectifs. Ce type de projection est une information précieuse dans un contexte de promotion des filières utilisant des ressources locales. En particulier, développer une filière écoconstruction locale et durable ne fait sens que si la ressource est suffisamment abondante et disponible sur le long terme.

Ainsi, dans un premier temps, un modèle d'occurrence de récolte est estimé à partir des données biophysiques issues de « placettes forestières »<sup>25</sup> (40 777 placettes pour la France entière) et des prix des bois. Pour chaque placette forestière, plusieurs informations sont reportées dont la pente, la surface terrière, la densité, l'essence objectif, la présence d'une gestion active et un indicateur d'occurrence de récolte. Par ailleurs la nature du régime foncier de chaque parcelle est déduite du croisement des données de l'IGN et des données de Corine Land Cover. Les données de prix des bois sont quant à elles tirées des bases de l'Office National des Forêts pour la période 2006-2016.

L'estimation du modèle d'occurrence des coupes montre que la récolte dépend bien du prix, quel que soit le régime foncier (privé ou public). Plus précisément, plus les prix du bois sur pied sont élevés, plus la probabilité que les gestionnaires forestiers prennent la décision de récolter est grande. Inversement, face à la baisse des prix du marché, les gestionnaires préfèrent reporter l'exploitation en attendant que les prix remontent. Cette tendance corrobore les résultats des études économiques portant sur le comportement d'exploitation des propriétaires forestiers privés mais l'étend à l'ensemble des régimes fonciers et pour toute la France. Par ailleurs, nous montrons que l'effet du prix du bois sur pied sur la récolte dépend des « essences objectifs ». Dit autrement, l'élasticité prix de l'offre est différente suivant les essences forestières. Nous montrons ainsi que l'offre de chêne, hêtre, et pin maritime est fortement élastique (élasticité-prix de l'offre supérieure à 1) tandis que l'offre de sapin, épicéa, douglas et, surtout, pin sylvestre est faiblement élastique (élasticité-prix de l'offre inférieure à 1). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce résultat : les essences relativement très exportées (hêtre, chêne) ou très substituables car utilisées dans de nombreuses industries (pin maritime) sont susceptibles d'être plus sensibles au prix que des essences alimentant des circuits de transformation plutôt domestiques avec des produits en aval ciblés et standardisés (sapin, épicéa, pin sylvestre et douglas). Il apparaît par ailleurs que la probabilité de récolte est plus importante dans les parcelles de forêts publiques. Cependant, ce résultat doit être nuancé. En effet, les parcelles de forêt privée qui font l'objet d'un document d'aménagement (Plan Simple de Gestion) montrent des occurrences de récolte très similaires à celles observées dans les forêts publiques. Plus que le régime foncier, c'est bien la présence d'un document d'aménagement qui semble augmenter la probabilité de récolte.

Nous intégrons ensuite ce modèle d'occurrence des coupes à un modèle de croissance individuelle des arbres afin de simuler à la fois le stock sur pied et l'offre de bois à l'échelle régionale et à moyen terme (2060) pour différentes valeurs des prix des bois. Les résultats, présentés sur la figure 12 pour deux régions administratives, montrent une augmentation des volumes récoltés au cours du temps, quel que soit le niveau de prix testé et pour les deux régions illustrées. Les résultats montrent notamment que

---

<sup>25</sup> Les placettes forestières constituent un dispositif d'échantillonnage à grande échelle de l'Inventaire forestier national (IFN) qui est sous la responsabilité de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Depuis 2005, l'IFN français est basé sur un schéma d'échantillonnage en deux phases (Hervé et al. 2014). La première phase suit un plan systématique basé sur une grille annuelle avec une intensité d'échantillonnage d'une placette tous les 10 km<sup>2</sup>. Les grilles systématiques des campagnes annuelles successives sont destinées à se chevaucher et à maintenir un plan de grille systématique tous les 5 ans. À chaque nœud de la grille, l'utilisation des terres est appréciée à l'aide de photographies aériennes. Dans la deuxième phase, un sous-échantillon des nœuds qui tombent dans les zones forestières est sélectionné au hasard pour les mesures effectuées au sol. Les parcelles de terrain sont situées au hasard dans une zone carrée de 900m×900m autour de chaque nœud.

l'augmentation de l'offre de bois entraîne une baisse du volume sur pied en 2060 par rapport à 2015 dans la région Grand Est, même avec un prix qui reste stable au cours du temps.

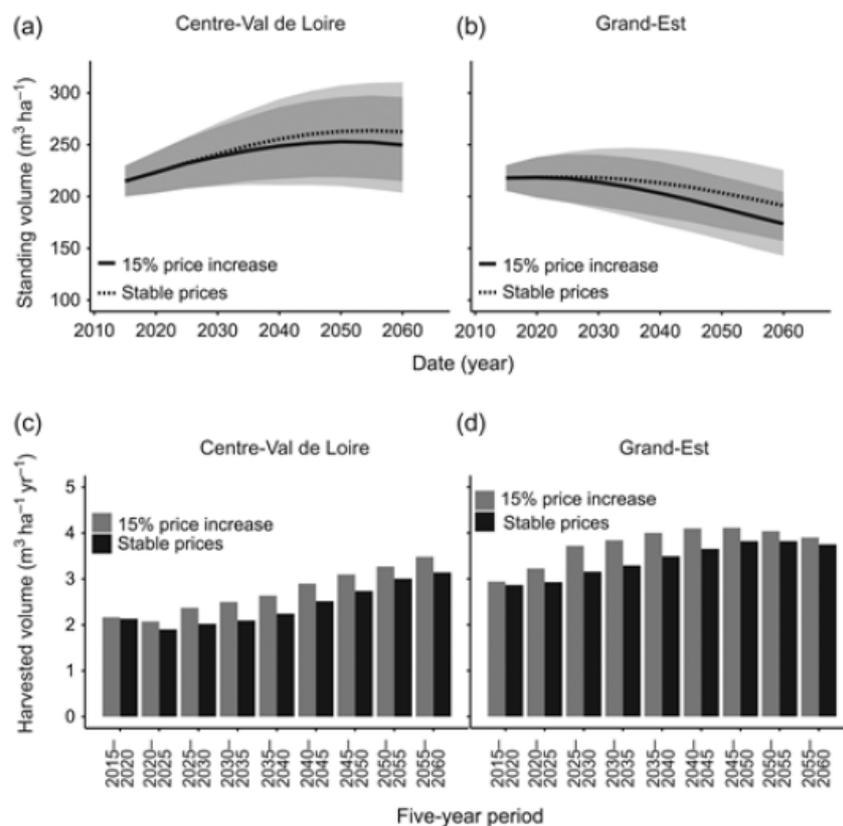


Figure 12: volumes sur pied (courbes du haut) et récoltes projetées (histogrammes du bas) de 2015 à 2060 pour des peuplements mixtes de chêne, de hêtre et de charme dans deux régions françaises ([18] Fortin et al., 2019).

Ce résultat bien qu'agréé, pose la question de la durabilité de l'exploitation des ressources forestières pour les nouvelles filières de la bioéconomie ou de l'écoconstruction. Si la biomasse forestière est souvent vue comme une manne providentielle et une ressource largement disponible, ces résultats apportent un élément contre-intuitif à ce débat et montrent que cela n'est pas nécessairement valable à une échelle régionale et quel que soit l'horizon temporel considéré. La région Grand Est, par exemple, semble au contraire suivre une autre dynamique, avec une baisse des stocks sur pied à l'horizon 2060. Il s'agit d'un résultat d'autant plus surprenant qu'il n'intègre pas les effets d'évènements climatiques directs ou indirects extrêmes (sécheresses, canicules, invasions de pathogènes, tempêtes, etc.) apparus récemment et dont on a pu constater le potentiel destructeur. En terme d'appui aux politiques publiques, ce résultat montre que le concept de durabilité, même s'il a été quelque peu délaissé ces dernières années doit rester une condition indispensable de toute incitation et de tout aménagement utilisant les ressources locales.

## 2.5. « Est-il possible de développer une bioéconomie durable basée sur le secteur forêt-bois en France ? » : des réponses mais beaucoup de questions en suspens

A ce stade de mon mémoire, je souhaite revenir sur la problématique initiale qui le porte : « *est-il possible de développer une bioéconomie durable basée sur le secteur forêt-bois en France ?* » et y apporter quelques éléments de réponses à la lumière des résultats présentés jusqu'ici.

Mes travaux ont montré que l'utilisation de produits bois dans la filière en substitution à d'autres produits est un levier d'atténuation majeur du changement climatique (levier « substitution »), contribuant à l'effort d'atténuation de la France et sur lequel reposent de nombreuses politiques actuelles

([12] Lobianco et al., 2016; [15] Caurla et al., 2018). Ces politiques relancent la consommation de produits en aval et stimulent la récolte et la transformation en amont, participant ainsi au développement économique d'un secteur fragile et peu structuré. Si l'approche semble vertueuse, mes travaux insistent néanmoins sur l'importance du calcul de la substitution, donnée exogène aux FSM. Généralement, les « coefficients de substitution » utilisés dans les FSM, comme dans le module carbone de FFSM, n'ont pas été calculés spécifiquement pour le modèle dans lequel ils sont utilisés. Ils sont issus d'Analyse de Cycles de Vie élaborées pour un produit, un substitut et un contexte particuliers, différant parfois sensiblement des situations pour lesquelles ils sont utilisés. Comme je le montre dans ([15] Caurla et al., 2018), certaines non-linéarités dans le système économique remettent en question la valeur de ces coefficients de substitution. Ce sont ces non-linéarités et l'ensemble des effets indirects liés à la consommation de bois que je souhaite étudier dans le premier axe de mon programme de recherche à venir. Je présente, dans la section 3.1, un cadre méthodologique novateur pour le faire.

Par ailleurs, si le local est souvent présenté comme durable dans le sens « écologique », nous montrons que pour le secteur forêt-bois, la rhétorique autour de la relocalisation revêt aussi, et peut-être surtout, une dimension économique tant le secteur est déficitaire en terme de balance commerciale. Or mes travaux montrent, d'une part, que cette relocalisation n'est pas si simple et présente certains coûts ([14] Lenglet, Courtonne, et Caurla, 2017) et, d'autre part, que la question des impacts environnementaux de la relocalisation est loin d'être tranchée. Mes recherches en cours sur cette question, notamment autour du projet PSDR4 « AFFORBALL », que j'ai coordonné entre 2016 et 2020, ont fait naître d'autres questions sur la représentation des échanges et du commerce extérieur dans les FSM. En effet, si les théories de Samuelson et d'Armington ont permis de représenter certaines composantes des échanges dans le modèle FFSM, elles ne permettent pas de capter toute la complexité de l'espace géographique. C'est l'objet de mon deuxième axe de recherche que je présente en section 3.2.

Enfin, une gestion forestière durable est aussi une gestion multifonctionnelle, permettant de satisfaire la fourniture d'un bouquet de services écosystémiques. Mes travaux montrent, qu'à long terme, il existe des arbitrages entre services. Ainsi, lorsque les gestionnaires adoptent une gestion active de leur forêt basée sur la maximisation des profits liés à la vente de leur bois, ils ont tendance à favoriser les essences plus rentables qui sont, souvent, les essences résineuses ([11] Lobianco et al., 2016). Lorsque les forêts ne sont plus seulement gérées pour le bois mais également pour la séquestration du carbone, la nature de la régénération change et, à long terme, les paysages forestiers sont plus diversifiés en termes d'essences et de types de gestion ([24] Riviere et Caurla, 2020b). Des arbitrages similaires apparaissent en réaction ou en anticipation des changements globaux. Ainsi, lorsque l'aversion au risque des gestionnaires est considérée, la forêt est plus diversifiée ([11] Lobianco, et al., 2016) et, en réaction à une attaque de pathogène touchant une essence forestière, les gestionnaires ont tendance à se détourner de l'essence au profit d'autres espèces et de structures alternatives ([17] Petucco, Lobianco, et Caurla, 2020). D'un point de vue méthodologique, mes travaux montrent que l'inclusion des services écosystémiques autres que le bois et l'atténuation dans les FSM est récente et en forte progression ([20] Riviere, Caurla, et Delacote, 2020). L'objet de mon troisième axe de recherche est de participer à ce développement en l'appliquant à des écosystèmes forestiers sous-étudiés dans les FSM : les forêts tropicales humides (section 3.3).

### 3. Programme de recherche

Mon programme de recherche s'articule autour de trois projets de recherche. La figure 13 reprend le même diagramme que la figure 2 et situe ces trois projets de recherche selon les mêmes axes de la littérature sur les FSM. En superposant les diagrammes de la figure 2 et de la figure 13, il apparaît que ce programme comble trois lacunes importantes : le projet de recherche n°1 (section 3.1) propose des développements méthodologiques importants et innovants pour l'étude de l'atténuation. Le projet de recherche n°2 (section 3.2) poursuit l'étude de la dimension spatiale mais l'étend à la question des marchés du bois. Enfin, le projet de recherche n°3 met les services écosystémiques au cœur de sa

problématique. Pour décrire chacun de ces projets, j'applique une trame relativement uniforme et traditionnelle : je présente les enjeux et l'état de l'art, éventuellement les résultats attendus et, de manière plus opérationnelle, les méthodes et équipes mobilisées. Avant d'en détailler le contenu, je précise que ce programme est volontairement dimensionné à l'échelle d'une équipe toute entière, et non à l'échelle d'un seul chercheur. Je n'ai donc pas vocation à réaliser directement l'ensemble des travaux décrits dans cette section mais plutôt à en piloter la réalisation.

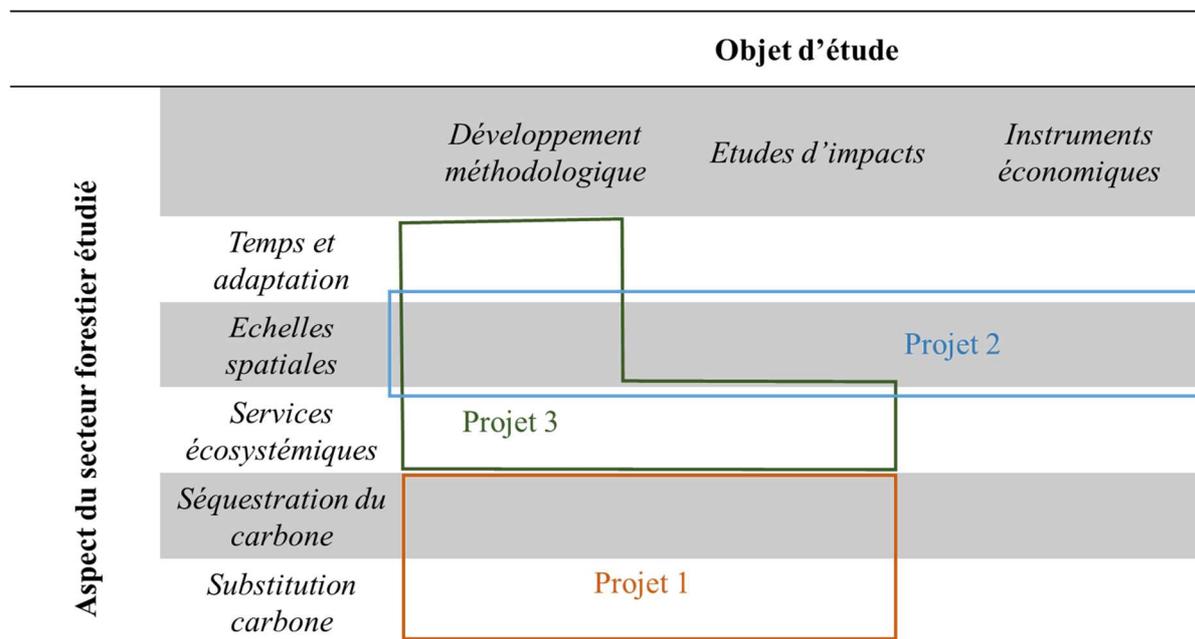


Figure 13: cartographie de mes projets de recherche selon les deux axes repris de la figure 2.

### 3.1. Substitutions directes et indirectes des émissions de carbone par les produits bois

#### **Enjeux**

Le principe de *substitution carbone* consiste à remplacer un produit par un substitut qui fournit le même service pour les activités humaines mais dont le cycle de vie émet moins de gaz à effet de serre (GES). La substitution carbone par les produits bois contribue ainsi de manière significative aux stratégies d'atténuation basées sur les socio-écosystèmes forestiers (Gustavsson et al., 2007). La substitution carbone est généralement quantifiée en tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> ou en tonnes de carbone et est calculée comme la différence entre les émissions de carbone d'une trajectoire de référence *sans consommation de bois supplémentaire* et celles d'une trajectoire alternative *avec consommation de bois supplémentaire*. Pour cela, les études actuelles se basent sur la comparaison d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV) des deux trajectoires dans une perspective « du berceau à la tombe ». L'ACV est une méthode normalisée utilisée pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service dans une perspective cycle de vie et multicritères (ISO 2006a; 2006b). Elle permet en outre d'identifier les transferts de pollution entre les étapes du cycle de vie et les catégories d'impact. La substitution est positive lorsque la trajectoire alternative émet moins de GES que la trajectoire de référence et négative dans le cas contraire.

L'application pratique du concept de substitution passe généralement par l'utilisation de coefficients de substitution (Sathre et O'Connor, 2010) (CS, généralement en MtCO<sub>2</sub> ou MtC par tonne de bois ou m<sup>3</sup> de bois) reflétant la variation des émissions de GES résultant de l'utilisation d'une unité de bois au lieu d'un autre matériau pour fournir un même service. En d'autres termes, c'est l'efficacité de l'utilisation

d'une unité de bois supplémentaire en termes de réduction des émissions de GES pour un service donné. La littérature montre une large gamme de valeurs de CS, même lorsque les scénarios comparés sont similaires. Par exemple, le bois utilisé pour la construction en Suisse évite l'émission de 1,3 tCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> dans une étude (Werner et al., 2005) mais seulement 0,5 tCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> dans une autre (Suter, Steubing, et Hellweg, 2017). Une méta-analyse de cette littérature montre que les CS pour les produits bois à longue et moyenne durées de vie sont compris dans une fourchette de - 2,3 à 15 tC évitées par tC contenu dans les produits bois (Sathre et O'Connor, 2010). Cette variabilité provient des différences dans la définition des limites du système pour les deux trajectoires comparées et dans l'inventaire des émissions associées. Dans ce premier axe de mon programme de recherche, je propose une méthode pour uniformiser et étendre ces limites aux flux et aux stocks de carbone en forêt et étendre l'inventaire des flux environnementaux aux effets indirects liés à la production et à la consommation des produits bois et de leurs substituts non-bois. Je propose d'appliquer cette méthode à un cas d'étude : le bois énergie pour la production de chaleur et d'électricité à l'échelle de la France entière avec des sorties régionalisées. Trois horizons temporels seront considérés : le court terme (<20 ans), le moyen terme (20-50 ans) et long terme (50-70 ans).

L'enjeu est important : une substitution carbone positive est la pierre angulaire de la rhétorique bioéconomique et une condition nécessaire à sa mise en œuvre. Par ailleurs, les politiques climatiques nationales et internationales s'appuyant sur le secteur forêt-bois ont jusqu'à présent favorisé les options basées sur la substitution plutôt que sur la séquestration dans les forêts, en supposant implicitement une substitution positive du carbone pour les produits du bois. La volonté de cet axe de recherche est de fournir une méthode solide pour déterminer et discuter cette substitution afin de renforcer l'efficacité des politiques forestières dans l'atténuation du changement climatique.

### ***Etat de l'art***

A ma connaissance, aucune approche scientifique ne permet actuellement d'inclure de manière cohérente et dynamique les conséquences d'une récolte de bois additionnelle à la fois sur les ressources forestières et sur la sphère socio-économiques dans un cadre d'ACV pour la quantification de la substitution du carbone par les produits bois. J'expose ici les hypothèses de recherche sur lesquelles se basera le travail et la littérature associée.

Le premier verrou à lever est la prise en compte de la dynamique du carbone forestier biogénique *in situ* dans le calcul de la substitution. La récolte durable de la biomasse forestière a traditionnellement été considérée comme neutre en carbone dans la littérature ACV, en se basant sur l'hypothèse que le carbone libéré pendant la combustion ou la décomposition de la biomasse est séquestré à nouveau dans la biomasse en croissance (Helin et al., 2013). Depuis 2010 cependant, des méthodologies d'ACV dynamique sont apparues (Levasseur et al., 2010) et considèrent notamment l'évolution de la « dette carbone » au cours du temps. Toutefois, l'absence de couplage entre les modèles de croissance forestière et l'ACV empêche toujours une prise en compte systématique et détaillée des flux et des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers. Par voie de conséquence, la plupart des études de substitution et les calculs de CS qui en résultent n'en tiennent pas compte. Mon hypothèse de recherche n°1 est que la prise en compte dynamique des flux et de stock de carbone *in situ* dans les deux trajectoires affecte la valeur de la substitution. Afin de tester cette hypothèse, un simulateur de croissance et de récolte développé dans un projet antérieur (Valade et al., 2018) sera couplé avec l'ACV du bois énergie en France.

D'autre part, les conditions environnementales et socio-économiques évoluent et interfèrent constamment avec les trajectoires de consommation ou de production. C'est le cas, par exemple, lorsque les conditions de croissance en forêt sont modifiées, lorsque des changements technologiques conduisent à l'apparition d'autres substituts ou d'autres technologies de transformation ou encore lorsque la récolte additionnelle de bois induit des compétitions ou des synergies et affecte d'autres secteurs. Toutes ces évolutions sont a priori susceptibles d'affecter la valeur de la substitution. En ce sens, la littérature a largement étudié les impacts du changement climatique et des dépôts d'azote sur la croissance des forêts (Valade et al., 2017; Kellomäki et al., 2018; Seely, Welham, et Scoullar, 2015; Naudts et al., 2015).

Cette littérature montre, par exemple, que la séquestration du carbone dans les forêts européennes pourrait évoluer dans une fourchette de -39 % à +34 % en réponse au changement climatique (Reyer et al. 2017). Si la littérature sur les effets du changement climatique est bien fournie, la littérature sur les conséquences de la dynamique des conditions socio-économiques sur la substitution est, elle, beaucoup plus lacunaire. C'est le second verrou que je souhaite lever et pour lequel je pose trois hypothèses de recherche supplémentaires :

- ❖ Hypothèse n°2 : les innovations technologiques sont supposées réduire les émissions (Unruh, 2000) et augmenter le captage et le stockage du carbone (Haszeldine, 2009) pour les produits bois et leurs substituts non-bois. Par exemple, les émissions de l'industrie sidérurgique peuvent diminuer si le gaz de coke - un sous-produit de l'industrie - est utilisé comme combustible (Yu et al., 2015). Un autre exemple est l'invention du bois lamellé-croisé qui permet la construction de bâtiments en bois à plusieurs étages (Tollefson, 2017), ce qui étend les possibilités de remplacer le fer et l'acier par le bois. Ma deuxième hypothèse de recherche est que la prise en compte de ces innovations technologiques peut affecter la valeur de substitution. Pour tester cette hypothèse, un modèle macroéconomique simple sera construit pour tenir explicitement compte des gains technologiques sur la productivité et pour modéliser les substitutions entre le bois-énergie et les autres sources d'énergie.
- ❖ Hypothèse n°3 : si, dans un monde globalisé, la production d'un produit bois ne peut être satisfaite faute de ressources et/ou de surfaces forestières disponibles (par exemple parce que cette ressource est affectée à un autre produit bois ou la surface est affectée à une autre production), une partie de la production manquante sera probablement importée, affectant l'utilisation des terres dans la région importatrice (Ostwald et Henders, 2014). Par exemple, les politiques de conservation des forêts en Finlande et en Chine ont conduit à augmenter la récolte de bois en Russie pour soutenir les consommations de bois finlandaise et chinoise. Ma troisième hypothèse de recherche est que la prise en compte des changements dynamiques d'utilisation des terres peut également affecter les valeurs de substitution. Pour tester cette hypothèse un module d'évolution des surfaces forestières sera construit dans le modèle FFSM permettant de modéliser les compétitions entre forêt et autres usages des terres. FFSM sera ensuite couplé au modèle Nexus Land Use (Souty et al., 2012) pour modéliser les fuites d'usage des terres à l'étranger. Les versions actuelles du modèle FFSM fonctionnent à surface forestière constante et ne modélisent que les changements d'espèces et de types de gestion (Lobianco et al., 2015) sans tenir compte de manière endogène de la dynamique des surfaces forestières en interaction avec les autres utilisations des terres, il s'agit donc d'une avancée majeure dans la modélisation du secteur forestier national.
- ❖ Hypothèse n°4 : Jevons a stipulé dès 1865 qu'en réduisant le prix de certains services, les améliorations technologiques peuvent augmenter la demande pour ces services ou d'autres: c'est l'effet rebond, également appelé paradoxe de Jevons (Azevedo, 2014). L'effet rebond peut être décomposé en effets directs et indirects (Sorrell, Dimitropoulos, et Sommerville, 2009). L'effet rebond direct est l'augmentation de la consommation qui suit une diminution du prix, elle-même due à une amélioration de l'efficacité énergétique. Il tend à compenser la réduction de la consommation d'énergie induite par l'amélioration de l'efficacité. L'effet rebond indirect englobe tous les impacts d'une baisse du prix du service énergétique sur les changements de demande d'autres biens, services et facteurs de production qui nécessitent également de l'énergie pour leur production. Par exemple, les économies réalisées par un ménage grâce à un système de chauffage plus efficace peuvent être investies dans des vacances à l'étranger nécessitant de prendre l'avion. Ce même type d'effet « pervers » s'observe dans le cas de la compensation morale, que l'on peut définir comme un « effet de contrecoup moral »: lorsqu'un individu a démontré ses valeurs morales, vis-à-vis de lui-même ou de la société, il sera plus enclin à les violer par la suite (Clot et al., 2014). De nombreuses études empiriques, principalement aux États-Unis, suggèrent que les effets rebonds (directs et indirects) et la compensation morale sont réels et peuvent avoir des conséquences significatives sur les volumes consommés (Sorrell, Dimitropoulos, et Sommerville, 2009). Ma quatrième hypothèse de recherche est que la prise en compte de ces effets rebonds et de la compensation morale peut affecter les valeurs de substitution. L'effet rebond a été largement exploré dans le cas des politiques économiques qui réduisent les prix perçus de l'énergie (Azevedo, 2014;

Sorrell, Dimitropoulos, et Sommerville, 2009) et la compensation morale est supposée être significative dans le cas des comportements pro-environnementaux (Clot et al., 2014). Cependant, ni l'un ni l'autre n'a été analysé spécifiquement dans le cas de produits bois. Nous proposons ici une contribution originale dans le domaine de l'économie comportementale en explorant l'effet de rebond et la compensation morale pour le bois-énergie, considéré comme une source d'énergie « écologique » par les consommateurs. Nous explorerons ainsi l'existence de ces effets et, s'ils existent, leurs ordres de grandeur. Enfin, nous testerons les normes sociales (Farrow, Grolleau, et Ibanez, 2017) comme mesure politique pour réduire ces effets.

### ***Résultats attendus***

Concernant la première hypothèse de recherche, la littérature montre que les stocks et les flux de carbone *in situ* sont dans une large mesure déterminés par la gestion forestière et, dans une moindre mesure, par les perturbations naturelles (Thom et al., 2018). Dans le cas de trajectoires pour lesquelles les volumes récoltés sont différents, on peut donc s'attendre à un impact significatif de la prise en compte des stocks et des flux de carbone dans le calcul de la substitution. Néanmoins, il est difficile d'anticiper l'ordre de grandeur de cet impact, d'autant plus qu'une récolte supplémentaire peut entraîner un rebond de la croissance en forêt. En ce qui concerne les conditions socio-économiques sur la substitution (hypothèses de recherche 2 à 4), nous nous attendons à ce que leurs conséquences soient limitées pour des horizons temporels de moins de 20 ans. En effet, en deçà de cet horizon temporel, la transposition des conditions socio-économiques actuelles est considérée comme acceptable (« Business-as-Usual »). En revanche, pour des horizons temporels plus longs (20-70 ans), on peut s'attendre à des impacts potentiellement importants. Pour la deuxième hypothèse de recherche, les gains technologiques futurs peuvent réduire les émissions dans le secteur du bois-énergie, dans les secteurs substitués, ou dans les deux secteurs. La substitution peut donc augmenter ou diminuer selon le secteur qui bénéficie le plus des gains technologiques. Pour la troisième hypothèse de recherche, l'utilisation du bois pour l'énergie peut entraver son utilisation pour un autre secteur (par exemple la construction). Cela peut augmenter les émissions liées aux substitués du bois construction (par exemple le ciment ou l'acier) et diminuer la valeur finale de la substitution carbone du bois-énergie. De même, l'augmentation de l'utilisation du bois peut accroître sa rentabilité et réduire la disponibilité des terres pour d'autres productions en France, ce qui peut entraîner des émissions indirectes supplémentaires (par exemple dans l'agriculture via une intensification des pratiques) et faire baisser la valeur de la substitution. Des « fuites d'émissions » à l'étranger sont également possibles (Mayer, 2005), ce qui conduirait à diminuer la valeur de la substitution. Pour la quatrième hypothèse de recherche enfin, les effets rebond et la compensation morale ont des impacts potentiellement élevés : après avoir acheté un produit en bois (ou changé leur chaudière fioul pour une chaudière bois), les consommateurs peuvent compenser leur achat pro-environnemental (ou dépenser leur pouvoir d'achat supplémentaire si le produit en bois est moins cher que son équivalent) en consacrant des revenus supplémentaires à l'achat de produits à forte intensité d'émissions. Dans ce cas, la substitution carbone peut diminuer et même devenir négative.

Outre les résultats attendus sur la substitution, la méthode développée permettra également d'évaluer les transferts sur d'autres catégories d'impact via l'ACV. Une hypothèse à ce niveau est que l'utilisation du bois à des fins énergétiques pourrait entraîner une augmentation de l'émission de particules ou de l'occupation des sols et conduire à des dommages supplémentaires sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes (Olsen et al. 2020).

### ***Méthodes et équipe mobilisée***

Cet axe de recherche est ambitieux et nécessite l'articulation de plusieurs disciplines (économie, sciences de l'environnement, sciences forestières) et plusieurs compétences (modélisation, expérimentations, gestion des données, etc.).

Pour cela, je l'ai construit avec l'appui d'un consortium, dont les membres ont été sélectionnés pour la complémentarité de leur expertise. Ce consortium réunit 12 scientifiques de 6 laboratoires différents :

le CEE-M (économie comportementale et expérimentale : Lisette Ibanez, Raphaële Préget, Jean-Marc Rousselle), ITAP (ACV : Eléonore Loiseau, Arnaud Hélias) le CIRED (Modélisation des usages des terres : Thierry Brunelle, Patrice Dumas), le BETA (économie du secteur forestier, macroéconomie de l'énergie et gestion des données : Alexandra Niedzwiedz, Antonello Lobianco, Verónica Acurio Vásconez), le CESAER (modélisation des dynamiques forestières : Valentin Bellassen) et Eco&Sols (modélisation des dynamiques forestières : Aude Valade).

La méthode s'appuiera sur une combinaison de modèles et de méthodes. Pour tester l'hypothèse de recherche n°1, nous nous appuierons sur le modèle de croissance forestière et les simulations obtenus à partir du projet BiCaFF financé par l'ADEME. Pour l'hypothèse de recherche n°2, nous développerons un modèle macroéconomique simple afin d'évaluer les conséquences des innovations technologiques sur l'efficacité énergétique des systèmes bois et non-bois et les niveaux de consommation d'énergie qui en résultent. Pour l'hypothèse de recherche n°3, nous nous baserons sur FFSM qui sera amélioré pour tenir compte de l'effet rebond direct, de la concurrence entre le bois énergie et les autres énergies et de la dynamique des surfaces forestières. Par ailleurs, l'impact d'une récolte supplémentaire sur la dynamique de la surface forestière, et ses conséquences sur le type d'utilisation des terres en France et à l'étranger seront calculés à l'aide d'un modèle global d'utilisation des terres afin d'estimer les émissions indirectes de la production de bois énergie (Brunelle et al., 2018). Pour tester l'hypothèse de recherche n°4, nous mobiliserons des méthodes expérimentales pour l'étude des comportements économiques de consommation de produits bois et les effets rebonds associés. Enfin, le calcul de la substitution carbone proprement dite sera réalisé à travers une ACV conséquentielle dynamique qui tiendra compte des changements dans la consommation de bois énergie incluant l'effet rebond direct, les changements dans la consommation d'autres sources d'énergie incluant l'effet rebond indirect et les effets de compensation morale, les changements dans le bilan carbone forestier *in situ* suite à une récolte supplémentaire de bois énergie et les changements dans l'utilisation des terres en France et à l'étranger. Par ailleurs, le cadre d'ACV fournira également la quantification des coefficients de substitution pour le bois-énergie, ainsi qu'un inventaire détaillé de tous les impacts environnementaux dans les deux trajectoires, afin d'identifier les transferts d'impacts.

### ***Financement***

Cet axe de recherche a fait l'objet de deux demandes de co-financements dont je suis coordinateur (AAPG-PRC 2020 de l'ANR, 495 k€ ; AàP Graine 2020 de l'ADEME, 240k€). Ces deux demandes sont en cours d'évaluation (2<sup>ème</sup> phase). Ces financements serviront, entre autres, à recruter deux doctorants (dont un que je co-encadrerai) et deux post-doctorants.

## **3.2. Modélisation du commerce international dans les FSM pour l'évaluation multi-échelle de ses impacts économiques et environnementaux**

### ***Enjeux***

L'essor de la bioéconomie centrée sur la biomasse forestière est au cœur de nombreuses stratégies de développement économique aux échelles internationale (OCDE bioeconomy strategy), communautaire (EU bioeconomy strategy en Europe) ou nationale (stratégie bioéconomie en France). Si la plupart de ces stratégies insistent sur une valorisation locale de la biomasse (voir section 2.4.), peu d'études sont aujourd'hui disponibles pour évaluer la durabilité d'une bioéconomie selon qu'elle s'inscrit dans un système de création de valeur locale ou, au contraire, globalisée. Or, le secteur bois est aujourd'hui largement internationalisé avec des chaînes de valeur fragmentées. La récente crise de la Covid-19 a questionné l'existence et la nature des liens entre la fragmentation des chaînes de production et la fragilité ou la « résilience » d'un secteur donné. Cet axe de recherche s'inscrit résolument dans cette problématique et cherche à évaluer les impacts économiques et environnementaux d'une délocalisation, ou de son corolaire, une relocalisation, des activités économiques du secteur forestier afin d'évaluer sa résilience face aux crises.

Si le contexte récent a propulsé la question sur le devant de la scène, elle se pose depuis longtemps dans le secteur forestier. En particulier, les conséquences économiques sur la perte nette de valeur ajoutée des exportations sont largement médiatisées depuis les années 2000. En 2018, la Fédération Nationale du Bois (FNB) interpellait le Gouvernement français au sujet de l'exportation croissante de grumes de chêne vers des pays comme la Chine. Cette polémique est révélatrice d'une polarisation croissante – depuis les années 60– des flux commerciaux de bois autour du continent asiatique et plus particulièrement autour de grands pays en transition comme la Chine, l'Inde, et l'Indonésie. La demande en bois ronds de ces derniers, notamment celle de la Chine, constitue aujourd'hui le moteur de la dynamique du commerce international du bois. Cette polarisation est supposée, en retour, freiner le développement des industries nationales de transformation et la création de valeur ajoutée sur le territoire français. La demande française est par conséquent, et pour partie, satisfaite grâce aux produits d'importation, creusant ainsi le déficit commercial français pour les produits bois. L'analyse en volume montre que les imports dans le secteur sont supérieurs de 2,8 Mm<sup>3</sup> aux exports, les secteurs les plus déficitaires étant la pâte à papier, les panneaux et les sciages.

Outre l'impact sur le déficit commercial, cette situation est également médiatisée pour ses conséquences environnementales supposées, en particulier les émissions de gaz à effet de serre dues aux transports et les changements directs ou indirects d'affectation des sols qu'elle peut entraîner.

Cet axe de recherche propose de construire un cadre de modélisation pour simuler les impacts du choix de la localisation des activités économiques sur le système économique et sur l'environnement, à plusieurs échelles (internationale, nationale, régionale, territoriale) et en prenant l'exemple du commerce des bois entre la France et les pays d'Asie.

### *Etat de l'art et hypothèses de recherche*

L'étude de la localisation des activités est centrale dans de nombreuses théories économiques. La théorie du commerce international basée sur les avantages comparatifs de Ricardo en 1817 et le modèle de Heckscher-Ohlin-Samuelson dans les années 1930 ont, très tôt, placé les dotations initiales en facteurs de production comme les déterminants de la spécialisation et de la localisation des activités (Bergstrand, 1990). Plus tard, à partir des années 1980, la nouvelle économie internationale de Krugman a introduit l'environnement oligopolistique comme un autre déterminant des comportements stratégiques d'échange et de spatialisation des activités. Par ailleurs, les modèles de gravité, en modélisant les flux commerciaux bilatéraux en fonction de la taille des économies et de la distance entre deux unités, ont permis de tenir compte de la proximité géographique dans le modèle économique spatial (Isard 1954) et la théorie du cycle des produits a permis d'introduire la notion de « retard technologique » en expliquant la répartition des activités en fonction de la place des pays dans le processus d'innovation (Grossman et Helpman, 1991).

Globalement, les théories développées en économie internationale sont essentielles pour comprendre les moteurs des échanges et l'implantation spatiale des activités mais elles n'ont pas été directement développées dans le but de simuler l'impact d'une re/dé-localisation sur le système économique à plusieurs échelles. Ainsi, si on connaît aujourd'hui les raisons principales qui motivent la relocalisation sur un territoire<sup>26</sup>, la littérature sur les conséquences économiques multi-échelles d'une relocalisation est plus fruste. Dans cette veine, on peut citer (di Giovanni, Levchenko, et Méjean, 2020) qui montrent que la fragmentation des chaînes de valeur induite par les délocalisations, si elle a permis aux entreprises de produire plus efficacement et à une plus grande échelle, présente des externalités, directes et indirectes, qui se matérialisent par le manque de résistance aux chocs de ces mêmes entreprises, d'où un système commercial global moins résilient. Les auteurs montrent que lorsque ces chaînes de valeur fragmentées sont soumises à un choc externe violent, comme ce fut le cas lors de la crise de la Covid-19, les conséquences économiques sont importantes et globales. Pour autant, Méjean, Martinez et

---

<sup>26</sup> Il existe quatre raisons principales à la relocalisation : l'automatisation de la production (la robotisation rend moins centrale les besoins de main d'œuvre), la demande (problèmes de qualité ou demande de produits locaux), la hausse des coûts de transport (critère d'autant plus important que le produit à transporter est lourd) et la hausse des coûts salariaux dans les pays où l'industrie s'était délocalisée (PIPAME, 2013).

Gerschel (2020) montrent que la relocalisation des chaînes de production ne permet pas nécessairement d'éviter ces conséquences et concluent qu'une solution pour cela est la diversification des sources d'approvisionnement qui permet de réduire l'exposition aux chocs en rendant les systèmes économiques locaux plus résilients.

Par ailleurs, les impacts environnementaux de la localisation des activités économiques n'ont été que récemment considérées par les économistes. Grossman et Krueger (1994) montrent à ce niveau que la libéralisation des échanges entraîne trois « effets » potentiels sur l'environnement. Un effet de composition tout d'abord, aligné sur la théorie des avantages comparatifs de Ricardo, qui conduit à une utilisation plus efficace des ressources naturelles. Un effet d'échelle ensuite, le libre-échange conduisant à accroître la production, cet accroissement peut se révéler délétère pour les ressources naturelles. Un effet technique enfin, les échanges permettant de diffuser des technologies plus propres et d'accroître les revenus conduisant à une meilleure préservation des ressources naturelles, selon l'effet bien connu de la courbe environnementale de Kuznet (Magnani, 2000). Les auteurs concluent que les impacts environnementaux sont la résultante de ces trois effets. Néanmoins, ce cadre d'analyse passe sous silence les émissions liées au transport et les effets de substitution différenciés entre pays, deux impacts particulièrement importants pour le secteur forestier. Ainsi, Cevallos, Bellassen et Grimault (2019) montrent que les émissions liées au transport (import et export internationaux) pour le secteur forestier français représentent 2,6 MtCO<sub>2</sub> équivalent par an. A travers l'étude de plusieurs scénarios prospectifs portant sur la relocalisation de la transformation, de la consommation ou des deux, les auteurs montrent que, si la relocalisation de la transformation est toujours positive du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, l'effet de la relocalisation de la consommation dépend de l'intensité d'émissions des substituts dans les pays importateurs. Par exemple, du bois énergie produit en France et exporté en Allemagne pour y être consommé présente un effet de substitution plus élevé (donc « évite plus d'émissions ») que du bois énergie produit en France et consommé en France. Ceci s'explique par le fait que l'utilisation du bois énergie en France se substitue à un mix énergétique beaucoup moins émetteur que le mix allemand.

Cette brève revue de la littérature nous conduit à plusieurs hypothèses. D'une part, la relocalisation pourrait combler le déficit de la balance commerciale et éviter la fragmentation des chaînes de valeur mais aussi, possiblement, réduire la diversification de ces chaînes de valeur. D'autre part, elle pourrait diminuer l'empreinte environnementale liée au transport mais pourrait également réduire l'efficacité dans l'exploitation et dans l'utilisation des ressources. Nous proposons ci-après un cadre théorique et méthodologique pour tester ces hypothèses.

### ***Méthodes, équipe mobilisée et financements***

Comme je le montre en section 1.2., la grande majorité des FSM actuels repose sur la même approche de modélisation des flux commerciaux de bois : il s'agit de modèles d'équilibre partiel à dynamique récursive reposant sur la théorie du prix d'équilibre spatial développée par Samuelson qui suppose, entre autres, une substituabilité parfaite des produits d'une région à l'autre (Samuelson, 1952). Dans sa thèse, Rougieux (2017) estime les élasticités prix et revenu de la demande des produits forestiers sur un panel de pays européens afin de mieux intégrer, dans ces FSM, les impacts sur la consommation de produits bois de la modification d'accords commerciaux. Si le travail a permis de mieux représenter les impacts globaux de cette modification sur les variables économiques agrégées, notamment sur la demande et le bien-être des agents économiques, il n'a pas permis d'améliorer la représentativité des flux commerciaux dans ces modèles, notamment à l'échelle infra-continentale. Or des travaux en cours auxquels je participe actuellement<sup>27</sup> démontrent une faible corrélation entre les flux de bois observés à l'échelle de la France (données de la base SITRAM) et les simulations de ces mêmes flux de bois par FFSM.

---

<sup>27</sup> Projet ADEME Graine AF Filières : <https://www.flux-biomasse.fr>

Afin de proposer des représentations alternatives des échanges dans les FSM, Valentin Mathieu, dont j'ai encadré le mémoire de Master 2 propose de s'orienter vers d'autres pans de la discipline économique, en particulier l'Economie Géographique (Mathieu, 2019), notamment à travers les modèles de Krugman (Krugman, 1980) et Melitz (Melitz, 2003). Contrairement à la théorie d'Armington, sur laquelle repose la représentation des flux internationaux dans FFSM, ces théories permettent de modéliser des rendements d'échelle croissants, la différenciation des produits au niveau des firmes (contre seulement le niveau des pays dans Armington), de tenir compte explicitement des coûts de transport et, pour la théorie de Melitz, de la productivité des firmes. A partir du travail de stage de Valentin Mathieu, nous proposons de développer un modèle de commerce international du bois en combinant la structure traditionnelle des FSM avec des méthodes et théories avancées issues de l'économie géographique et de l'écologie industrielle, dont les théories développées par Krugman et Melitz et leurs extensions en économie urbaine (Fujita, Krugman, et Venables, 1999). Les villes et les zones urbaines, absentes des FSM traditionnels, bien que présentes dans les théories originelles du commerce international comme celle de Samuelson, seront représentées comme centres de gravité, ou comme « nœuds » des flux commerciaux mondiaux de bois, suivant la théorie de Dollfus sur l'Archipel Métropolitain Mondial (Dollfus, 1994). Ce faisant, le projet de recherche vise à mieux représenter spatialement et de manière réaliste les flux commerciaux du bois et leur dynamique. Le modèle sera ensuite utilisé pour tester plusieurs scénarios susceptibles d'influencer les flux à différentes échelles (internationale, nationale, régionale et territoriale), pour les cas de délocalisations et de relocalisations. Les impacts économiques de ces scénarios seront calculés directement par le modèle. Les impacts environnementaux seront évalués à l'aide de couplages avec des modèles d'usages des sols et des outils d'évaluation environnementale (comme l'ACV). L'exercice de modélisation permettra d'évaluer la résilience du système global de commerce de bois et de certaines de ses alternatives.

Cet axe de recherche a été développé en partenariat avec le CIRAD en Malaisie (économie du développement et économie internationale, Jean-Marc Roda). Une thèse que j'encadrerai débutera en octobre 2020 (Valentin Mathieu qui a déjà réalisé son stage sur le sujet), elle est financée par le Labex ARBRE et la région Grand Est.

### 3.3. Prise en compte des synergies et arbitrages entre services écosystémiques dans les FSM : application au secteur forestier de la Guyane française

#### *Enjeux et état de l'art*

Forte d'une forêt tropicale humide peu perturbée recouvrant 96% de son territoire (plus de 8 millions d'hectares), la Guyane représente l'un des « points chauds » de biodiversité les plus importants au monde. Ce patrimoine environnemental et les produits qui y sont liés se situent aujourd'hui au cœur de plusieurs enjeux. D'une part les activités de déforestation illégale, de dégradation et de fragmentation menacent leur devenir. D'autre part, à travers l'exploitation de ses produits, et notamment du bois, la forêt est de plus en plus considérée comme une opportunité de développement local (IEDOM, 2019). Enfin, le secteur de la forêt et du bois interagit de manière complexe avec la filière orpaillage qui représente, avec l'aérospatiale, l'un des piliers du développement du territoire.

L'Etat français dispose de la majorité de la propriété du massif forestier et le gère sur la zone nommée Domaine Forestier Permanent (DFP) par l'intermédiaire de l'Office National des Forêts (ONF). La politique forestière appliquée au territoire est conservatoire et se caractérise par une exploitation à faible impact et par la distribution d'aides sous la forme de financement au développement des filières bois en aval, aujourd'hui déficitaires et dépendantes des investissements publics. Dans un contexte de limitation des dépenses publiques et d'une baisse d'investissement de l'Etat dans les territoires, il apparaît plus que jamais nécessaire de favoriser les politiques économiques aboutissant à des trajectoires durables pour les filières bois, à la fois des points de vue économique, environnemental et social.

Parmi les trajectoires envisagées, la production de bois d'œuvre et de bois énergie apparaissent comme prioritaires, afin de satisfaire la demande locale en bois et les besoins énergétiques du territoire. Pour satisfaire ces activités, se pose la question du choix entre, d'une part, la poursuite de l'exploitation à faible impact et, d'autre part, le recours à du bois issu de forêt de plantation. Cette seconde option est

vue comme une solution de « moindre regret » en concentrant les impacts environnementaux sur une zone restreinte tout en maximisant la production (Lopez, 2016). Les plantations présentent également l'avantage de restreindre le maillage de routes forestières ce qui réduit d'autant l'accessibilité au territoire et les perturbations anthropiques qui y sont liées comme la chasse et la rupture des corridors écologiques. Cependant la question de leur mise en place sur des zones actuellement boisées ou allouables à l'agriculture pose la question de leur impact sur la forêt primaire et de la compétition entre les différents usages des terres.

Par ailleurs, la forêt et la filière bois interagissent de manière complexe avec la filière orpaillage. Actuellement, deux réseaux d'exploitation aurifère coexistent: la filière légale et celle illégale. Quel que soit le réseau, l'exploitation aurifère en forêt peu perturbée conduit, à court terme, à une destruction nette de la biodiversité et des services écosystémiques produits par la forêt. D'un côté, si la restauration écologique est obligatoire, elle n'est effective que pour la filière légale. Se pose alors la question du type de restauration et de la capacité de recouvrement de la fourniture de services écosystémiques des zones restaurées. D'un autre côté, l'intensité de l'exploitation illégale est liée à plusieurs facteurs. Elle augmente avec le cours du marché de l'or (Dezecache et al., 2017) et est également favorisée par la présence de routes forestières, elles-mêmes liées au type de gestion forestière adoptée. Elle diminue avec l'intensité de la répression mais on observe dans ce cas une fuite de l'exploitation dans les pays voisins, le Suriname et le Guyana, ce qui soulève l'importance d'une politique de lutte contre la déforestation coordonnée à l'échelle des pays du plateau des Guyanes, et questionne la mise en place des projets de type REDD+ (Dezecache, 2017; Decache et al., 2017).

En résumé, les interactions entre les politiques économiques mises en place pour le secteur du bois et les politiques réglementaires encadrant la filière aurifère ont des effets incertains et parfois ambigus sur la capacité de ces secteurs à se développer tout en maintenant le patrimoine naturel et les services écosystémiques rendus par ce patrimoine et sans favoriser les fuites de déforestation vers les autres pays du plateau des Guyanes. Dans ce contexte, notre question de recherche est la suivante : un développement durable des filières forêt-bois et or en interaction est-il possible en Guyane française ? Nous définissons ici la durabilité comme le maintien des fonctions du système socio-écologique guyanais selon une trajectoire souhaitée, dans un intervalle de probabilité connu et pendant un temps donné.

### **Méthodes**

A ce jour, il n'existe pas d'outil simulant de manière intégrée les enjeux de conservation des écosystèmes et d'exploitation des ressources naturelles pour la Guyane. Or, l'étude des trajectoires de développement durable n'est possible qu'en tenant compte des rétroactions entre les différentes parties du système bioéconomique que constitue le territoire guyanais. Pour cela, deux enjeux méthodologiques sont centraux dans le projet. D'une part il s'agit de modéliser l'impact de l'exploitation des bois sur la fourniture des services écosystémiques et, d'autre part, de modéliser l'économie du secteur forêt-bois sur le territoire guyanais. Un troisième enjeu, la modélisation des filières aurifères, fera l'objet d'un partenariat avec un groupe de recherche du Labex Ressources 21.

Vis-à-vis du premier enjeu, il apparaît que toute exploitation, même sélective, peut avoir des impacts négatifs comme des changements de composition et de diversité, voire l'extinction locale de certaines espèces (Martin et al., 2015; Yguel et al., 2018; Pinagé et al., 2019). Les écosystèmes forestiers tropicaux présentent une diversité en termes d'essences incomparable avec les écosystèmes tempérés. De ce fait, en comparaison avec mes recherches passées et le développement du modèle FFSM, un travail central dans cet axe de recherche sera de modéliser cette diversité qui n'est, aujourd'hui, que rarement intégrée aux modèles de dynamique forestière (Blanc et al., 2016) et *a fortiori* dans les FSM.

Trois catégories de modèles peuvent être mobilisées pour pallier cette lacune (Gourlet-Fleury, 1997). Une première catégorie consiste à modéliser les communautés végétales à travers des *modèles matriciels* qui représentent les forêts selon leur distribution en classe d'âge, de diamètre, de biomasse, etc. L'évolution des forêts est alors simulée par un calcul matriciel faisant évoluer le vecteur de distribution (Favrichon, 1995). Le module « ressource » du modèle FFSM développé pour la France métropolitaine

entre dans cette première catégorie. Deuxièmement, et de façon plus fine, les *gaps-models* assimilent les massifs forestiers à une mosaïque de patchs aux caractéristiques environnementales biotiques et abiotiques déterminées (richesse spécifique, traits fonctionnels moyens, densité d'arbres, intensité de la perturbation et temps écoulé, etc.), comme le modèle FORMIND (Cailleret et al., 2019). Les patchs évoluent indépendamment, selon des paramètres de croissance, de mortalité et de recrutement calculés de façon plus ou moins complexe en fonction des caractéristiques de chaque patch. Une troisième approche plus précise encore correspond aux modèles individu-centrés (Maréchaux et Chave, 2017). Ces modèles peuvent intégrer des processus physiologiques en tenant compte des caractéristiques fonctionnelles des espèces et des interactions entre individus (compétition ou processus de densité dépendance). Ils permettent ainsi une interprétation en termes de fourniture de services écosystémiques (e.g. Chave et al., 2009; Díaz et al., 2016).

Afin de bénéficier de la précision de représentation des *modèles individus-centrés* et de l'échelle de représentation des *gaps-models*, nous couplerons le modèle TROLL (individus-centrés: Fischer, Maréchaux, et Chave, 2019) avec FORMIND (gap-model). Cette étape fera l'objet d'une collaboration avec Stéphane Traissac et Eric Marcon de l'UMR EcoFog à Kourou, spécialistes de l'écologie des forêts tropicales et impliqués dans le développement de ces modèles.

Vis à vis du deuxième enjeu, la modélisation de la dynamique de la filière bois doit permettre d'évaluer les trajectoires de développement territorial en fonction de leur intérêt économique, social, de leur capacité de résilience et de leur coût en capital naturel. Nous nous baserons sur la structure de FFSM et nous en développerons une version régionale, prenant explicitement en compte les spécificités locales. Ainsi, en particulier, si le modèle FFSM propose une représentation des produits assez sommaires avec trois produits primaires (bois d'œuvre feuillus, bois d'œuvre résineux et bois industrie/bois énergie) et six produits transformés (sciages résineux, feuillus, placages, panneaux, bois énergie, pâte à papier), ces produits ne correspondent pas à la réalité de la filière bois guyanaise. Celle-ci repose aujourd'hui sur cinq espèces qui représentent 90% du volume exploité. Une étude préalable des types de produits transformés et consommés et donc nécessaire. Suite à cela, une fonction d'offre pour chaque espèce selon le scénario d'aménagement considéré et une fonction de demande pour chaque produit en aval seront estimées et calibrées.

Par ailleurs, dans le modèle FFSM, le marché est supposé parfait avec un équilibre atteint à chaque pas de temps (1 an). Même si, en réalité, le marché métropolitain est loin d'être parfait, cette hypothèse tient du fait du grand nombre et de la diversité des offreurs et des demandeurs. La situation guyanaise est différente puisque l'Etat a le monopole sur l'offre locale de bois et, en amont, sur la gestion des forêts. A cela s'ajoute un très petit nombre de marchés extérieurs pour les bois locaux, la plupart de la demande pour ces derniers émanant également de l'Etat. Malgré la ressource abondante, la demande privée est donc essentiellement alimentée par l'import. Actuellement, la volonté de l'Etat et des acteurs de la filière qui le représentent est de s'ouvrir vers d'autres secteurs en demande (bois énergie, construction) afin de concurrencer les produits d'import. La version guyanaise de FFSM devra tenir compte de ces différents types de marchés à travers l'estimation d'élasticité prix de l'offre et de la demande pour chaque produit et pour chaque situation de concurrence. Pour cela nous pourrions compter sur les données des prix des produits bois centralisées par l'ONF et, lorsque les marchés n'existent pas encore, nous utiliserons les valeurs utilisées dans d'autres FSM, en y associant une analyse de sensibilité. Par ailleurs, une autre spécificité de l'offre de bois en Guyane sont les coûts fixes très élevés liés à la création de piste, nous intégrerons ces coûts en plus des coûts de transformation et des coûts de transports déjà pris en compte dans FFSM.

Enfin si, dans FFSM, les échanges avec le reste du monde sont agrégés sans distinguer les pays importateurs/exportateurs, pour la Guyane, la grande majorité des échanges a lieu avec l'Europe d'une part et les Antilles d'autre part. Nous construirons donc un modèle basé sur la théorie d'Armington entre la Guyane et ces deux localités, en estimant les élasticités de substitution nécessaires.

## *Equipe et financement*

Le cœur du projet est une collaboration entre le BETA à Nancy et EcoFog à Kourou, il se base sur les compétences de ces deux unités en modélisation économique et en écologie tropicale. Une thèse bi-disciplinaire (Guillaume Salzet) que je co-encadrerai sera cofinancée à la rentrée 2020 par le Labex Ressources 21 et le département EcoSocio d'INRAE. Le Labex Ressources 21 soutient par ailleurs le projet et financera une thèse complémentaire sur la thématique « or », créant ainsi une communauté de recherche active entre Nancy et la Guyane sur la thématique du développement économique durable de cette région. Ce programme a par ailleurs été présenté aux partenaires potentiels locaux (notamment ONF et Maison de la Forêt et du Bois) qui soutiennent l'initiative et se tiennent prêt à collaborer sous la forme de la fourniture de données. Le modèle développé sera le premier modèle bioéconomique pour une région tropicale et pourra être adapté dans le futur à des contextes similaires sur le bassin amazonien.

## Conclusion

Ces perspectives de recherche poursuivent et approfondissent l'analyse de la durabilité du secteur forêt-bois. Pour cela, j'intègre de nouvelles méthodologies issues d'autres branches de l'économie, en particulier l'économie géographique, l'économie internationale ou l'économie expérimentale. J'approfondis également la question de l'échelle des représentations, question qui est au cœur du projet présenté dans la section 3.2. J'étends enfin les représentations aux socio-écosystèmes forestiers tropicaux dans le projet de la section 3.3, ce qui fait naître de nouvelles questions tant les enjeux de durabilité sont dépendants des contextes environnementaux, politiques et économiques locaux.

Les modèles de simulation demeurent au cœur de mes perspectives de recherche. A ce jour, ils constituent encore, il me semble, un domaine sous-estimé par les sciences économiques, comparativement aux autres branches méthodologiques plus prolifiques que sont les modèles théoriques, économétriques ou l'économie expérimentale. Pourtant les modèles de simulation sont tout à la fois capables d'agréger les connaissances issues de ces différentes branches mais également d'autres disciplines, débouchant sur une « vraie » interdisciplinarité, articulant et couplant différents savoirs en un lieu unique de débat, de réflexion et de co-construction. Ils sont par ailleurs des outils privilégiés pour étudier les futurs et comprendre les déterminants de la durabilité des trajectoires de développement des secteurs forêt-bois.

Après 12 ans de développement continu, le modèle FFSM, ou plutôt le « projet FFSM » tant les ramifications sont nombreuses, reste le socle de mes perspectives de recherche. S'il a atteint un certain degré de maturité dans les représentations de l'amont du secteur forêt bois, la poursuite de son développement constitue un enjeu central de mes futurs travaux dans le monde de la recherche.

## Bibliographie

- Adams, Darius M, et Richard W Haynes. 2007. *Resource and Market Projections for Forest Policy Development Twenty-Five Years of Experience with the US RPA Timber Assessment*. Dordrecht: Springer.
- Alexandre, Sylvie. 2017. « Rapport de mission de la déléguée interministérielle à la forêt et au bois ». CGEDD.
- Allen, Craig D., Alison K. Macalady, Haroun Chenchouni, Dominique Bachelet, Nate McDowell, Michel Vennetier, Thomas Kitzberger, et al. 2010. « A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests ». *Forest Ecology and Management* 259 (4): 660-84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>.
- Armington, Paul S. 1969. « A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production (Une theorie de la demande de produits differencies d'apres leur origine) (Una teoria de la demanda de productos distinguiendolos segun el lugar de produccion) ». *Staff Papers - International Monetary Fund* 16 (1): 159. <https://doi.org/10.2307/3866403>.
- Azevedo, Inês M.L. 2014. « Consumer End-Use Energy Efficiency and Rebound Effects ». *Annual Review of Environment and Resources* 39 (1): 393-418. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021913-153558>.
- Aznar-Sánchez, José, Luis Belmonte-Ureña, María López-Serrano, et Juan Velasco-Muñoz. 2018. « Forest Ecosystem Services: An Analysis of Worldwide Research ». *Forests* 9 (8): 453. <https://doi.org/10.3390/f9080453>.
- Bauhus, Jürgen, David I. Forrester, Barry Gardiner, Hervé Jactel, Ramon Vallejo, et Hans Pretzsch. 2017. « Ecological Stability of Mixed-Species Forests ». In *Mixed-Species Forests*, édité par Hans Pretzsch, David I. Forrester, et Jürgen Bauhus, 337-82. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_7).
- Bavard, Denis, Olivier de Lagarde, et Max Magrum. 2013. « Evaluation de volet mobilisation des bois chablis (plan de solidarité nationale consécutif à la tempête Klaus du 24 janvier 2009). » Rapport du CGAAER n°12078.
- Beach, Robert H, Yongxia Cai, Allison Thomson, Xuesong Zhang, Russell Jones, Bruce A McCarl, Allison Crimmins, et al. 2015. « Climate change impacts on US agriculture and forestry: benefits of global climate stabilization ». *Environmental Research Letters* 10 (9): 095004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/095004>.
- Beaussier, Thomas, Sylvain Caurla, Véronique Bellon-Maurel, et Eleonore Loiseau. 2019. « Coupling Economic Models and Environmental Assessment Methods to Support Regional Policies: A Critical Review ». *Journal of Cleaner Production* 216 (avril): 408-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.020>.
- Bengston, David N., Stanley T. Asah, et Brett J. Butler. 2011. « The Diverse Values and Motivations of Family Forest Owners in the United States: An Analysis of an Open-Ended Question in the National Woodland Owner Survey ». *Small-Scale Forestry* 10 (3): 339-55. <https://doi.org/10.1007/s11842-010-9152-9>.
- Bergstrand, Jeffrey H. 1990. « The Heckscher-Ohlin-Samuelson Model, The Linder Hypothesis and the Determinants of Bilateral Intra-Industry Trade ». *The Economic Journal* 100 (403): 1216. <https://doi.org/10.2307/2233969>.
- Bertrand, Vincent, Benjamin Dequiedt, et Elodie Le Cadre. 2014. « Biomass for Electricity in the EU-27: Potential Demand, CO2 Abatements and Breakeven Prices for Co-Firing ». *Energy Policy* 73 (octobre): 631-44. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.007>.

- Blanc, Lilian, Eric-André Nicolini, Didier Sabbadin, Hélène Morel, Sandre Nicolle, Laurent Descroix, et Jacques Beauchene. 2016. « Conservation of tropical humid forest and wood supply in French Guiana: how sustainable forest plantation could help to respond to local demand in the future? » In *Tropical ecology and society reconciling conservation and sustainable use of biodiversity.*, Résumé:p.-221. Montpellier, France. <http://agritrop.cirad.fr/581138/>.
- Bösch, Matthias, Dominik Jochem, Holger Weimar, et Matthias Dieter. 2015. « Physical Input-Output Accounting of the Wood and Paper Flow in Germany ». *Resources, Conservation and Recycling* 94 (janvier): 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.014>.
- Böttcher, Hannes, Stefan Frank, Petr Havlík, et Berien Elbersen. 2013. « Future GHG Emissions More Efficiently Controlled by Land-Use Policies than by Bioenergy Sustainability Criteria ». *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 7 (2): 115-25. <https://doi.org/10.1002/bbb.1369>.
- Brockerhoff, Eckehard G., Luc Barbaro, Bastien Castagneyrol, David I. Forrester, Barry Gardiner, José Ramón González-Olabarria, Phil O'B. Lyver, et al. 2017. « Forest Biodiversity, Ecosystem Functioning and the Provision of Ecosystem Services ». *Biodiversity and Conservation* 26 (13): 3005-35. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>.
- Brunelle, T., P. Dumas, W. Ben Aoun, et Benoit Gabrielle. 2018. « Unravelling Land-Use Change Mechanisms at Global and Regional Scales ». *BioPhysical Economics and Resource Quality* 3 (3): 13. <https://doi.org/10.1007/s41247-018-0047-2>.
- Brunette, Marielle, et Sylvain Caurla. 2016. « An Economic Comparison of Risk Handling Measures against *Hylobius Abietis* and *Heterobasidion Annosum* in the Landes de Gascogne Forest ». *Annals of Forest Science* 73 (3): 777-87. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0568-z>.
- Brunette, Marielle, Jérôme Foncel, et Eric Nazindigouba Kéré. 2017. « Attitude Towards Risk and Production Decision: An Empirical Analysis on French Private Forest Owners ». *Environmental Modeling & Assessment* 22 (6): 563-76. <https://doi.org/10.1007/s10666-017-9570-6>.
- Buongiorno, J. 2015. « Global Modelling to Predict Timber Production and Prices: The GFPM Approach ». *Forestry* 88 (3): 291-303. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu047>.
- Buongiorno, Joseph, et Shushuai Zhu. 2013. « Consequences of Carbon Offset Payments for the Global Forest Sector ». *Journal of Forest Economics* 19 (4): 384-401. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2013.06.005>.
- Cailleret, Maxime, Nicolas Bircher, Florian Hartig, Lisa Hülsmann, et Harald Bugmann. 2019. « Bayesian Calibration of a Growth-dependent Tree Mortality Model to Simulate the Dynamics of European Temperate Forests ». *Ecological Applications*, octobre, eap.2021. <https://doi.org/10.1002/eap.2021>.
- Caurla, Sylvain. 2012. « Modélisation de la filière forêt-bois. Evaluation des impacts des politiques climatiques ». AgroParisTech.
- Caurla, Sylvain, Vincent Bertrand, Philippe Delacote, et Elodie Le Cadre. 2018. « Heat or Power: How to Increase the Use of Energy Wood at the Lowest Cost? » *Energy Economics* 75 (septembre): 85-103. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.011>.
- Caurla, Sylvain, Philippe Delacote, Franck Lecocq, et Ahmed Barkaoui. 2013. « Stimulating Fuelwood Consumption through Public Policies: An Assessment of Economic and Resource Impacts Based on the French Forest Sector Model ». *Energy Policy* 63 (décembre): 338-47. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.111>.
- Caurla, Sylvain, Philippe Delacote, Franck Lecocq, Julien Barthès, et Ahmed Barkaoui. 2013. « Combining an Inter-Sectoral Carbon Tax with Sectoral Mitigation Policies: Impacts on the French Forest Sector ». *Journal of Forest Economics* 19 (4): 450-61. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2013.09.002>.
- Caurla, Sylvain, Serge Garcia, et Alexandra Niedzwiedz. 2015. « Store or Export? An Economic Evaluation of Financial Compensation to Forest Sector after Windstorm. The Case of Hurricane

- Klaus ». *Forest Policy and Economics* 61 (décembre): 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.06.005>.
- Caurla, Sylvain, et Antonello Lobianco. 2020. « Estimating Climate Service Value in Forestry: The Case of Climate Information on Drought for Maritime Pine in Southwestern France ». *Climate Services* 17 (janvier): 100106. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100106>.
- Cevallos, Gabriela, Valentin Bellassen, et Julia Grimault. 2019. « Relocaliser la filière bois française : une bonne idée pour le climat », 2019, I4CE édition.
- Chave, Jerome, David Coomes, Steven Jansen, Simon L. Lewis, Nathan G. Swenson, et Amy E. Zanne. 2009. « Towards a Worldwide Wood Economics Spectrum ». *Ecology Letters* 12 (4): 351-66. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>.
- Clot, Sophie, Gilles Grolleau, Lisette Ibanez, et Peguy Ndodjang. 2014. « L'effet de compensation morale ou comment les « bonnes actions » peuvent aboutir à une situation indésirable ». *Revue économique* 65 (3): 557. <https://doi.org/10.3917/reco.653.0557>.
- Costanza, Jennifer K., Robert C. Abt, Alexa J. McKerrow, et Jaime A. Collazo. 2017. « Bioenergy Production and Forest Landscape Change in the Southeastern United States ». *GCB Bioenergy* 9 (5): 924-39. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12386>.
- Courtonne, Jean-Yves, Julien Alapetite, Pierre-Yves Longaretti, Denis Dupré, et Emmanuel Prados. 2015. « Downscaling Material Flow Analysis: The Case of the Cereal Supply Chain in France ». *Ecological Economics* 118 (octobre): 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.007>.
- Dahan, Amy. 2007. *Les modèles du futur*. Recherches. Paris: La Découverte. <https://www.cairn.info/les-modeles-du-futur--9782707150134.htm>.
- Dantzig, Georges. 1950. « Simplex Solution of the Hitchcock-Koopmans Transportation Problem ». *Headquarters USAF Comptroller*, 1950.
- Delpech, R., G. Dumé, et P. Galmiche. 1985. *Typologie des stations forestières: vocabulaire*. Paris: Ministère de l'Agriculture/Direction des Forêts, Institut pour le Développement Forestier.
- Denardou, Anaïs. 2018. « Changements du stock de bois sur pied des forêts françaises ». Université de Lorraine.
- Dezecache, Camille. 2017. « Les fondements de REDD+ à l'épreuve des modèles de déforestation : cas d'étude sur le Plateau des Guyanes ».
- Dezecache, Camille, Emmanuel Faure, Valéry Gond, Jean-Michel Salles, Ghislain Vieilledent, et Bruno Herault. 2017. « Gold-rush in a forested El Dorado: Deforestation leakages and the need for regional cooperation ». *Environmental Research Letters* 12 (février): 19. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6082>.
- Dezecache, Camille, Jean-Michel Salles, Ghislain Vieilledent, et Bruno Herault. 2017. « Moving forward socio-economically focused models of deforestation ». *Global Change Biology* 23 (septembre): 3484-3500. <https://doi.org/10.1111/gcb.13611>.
- Díaz, Sandra, Jens Kattge, Johannes H. C. Cornelissen, Ian J. Wright, Sandra Lavorel, Stéphane Dray, Björn Reu, et al. 2016. « The Global Spectrum of Plant Form and Function ». *Nature* 529 (7585): 167-71. <https://doi.org/10.1038/nature16489>.
- Dollfus, Olivier. 1994. *L'espace monde*. Géo poche 2. Paris: Economica.
- Duncker, Philipp S., Karsten Raulund-Rasmussen, Per Gundersen, Klaus Katzensteiner, Johnny De Jong, Hans Peter Ravn, Mike Smith, Otto Eckmüllner, et Heinrich Spiecker. 2012. « How Forest Management Affects Ecosystem Services, Including Timber Production and Economic Return: Synergies and Trade-Offs ». *Ecology and Society* 17 (4): art50. <https://doi.org/10.5751/ES-05066-170450>.
- Earles, J. Mason, Anthony Halog, Peter Ince, et Kenneth Skog. 2013. « Integrated Economic Equilibrium and Life Cycle Assessment Modeling for Policy-Based Consequential LCA: Partial

- Equilibrium and LCA for Policy-Based LCA ». *Journal of Industrial Ecology* 17 (3): 375-84. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00540.x>.
- « Editorial Brief ». 2016. *Climate Services* 1 (mars): 1. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.03.001>.
- FAO. 2004. « La contribution du secteur forestier aux économies nationales : tendances et situation actuelle ».
- Farrow, Katherine, Gilles Grolleau, et Lisette Ibanez. 2017. « Social Norms and Pro-Environmental Behavior: A Review of the Evidence ». *Ecological Economics* 140 (octobre): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.017>.
- Favrichon, Vincent. 1995. « Modèle matriciel déterministe en temps discret. Application à l'étude de la dynamique d'un peuplement forestier tropicale humide (Guyane Française) ». Lyon: Université de Lyon 1.
- Ficko, Andrej, Gun Lidestav, Áine Ní Dhubháin, Heimo Karppinen, Ivana Zivojinovic, et Kerstin Westin. 2019. « European Private Forest Owner Typologies: A Review of Methods and Use ». *Forest Policy and Economics* 99 (février): 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.09.010>.
- Fischer, Fabian Jörg, Isabelle Maréchaux, et Jérôme Chave. 2019. « Improving Plant Allometry by Fusing Forest Models and Remote Sensing ». *New Phytologist* 223 (3): 1159-65. <https://doi.org/10.1111/nph.15810>.
- Folsland Bolkesjø, Torjus, Erik Trømborg, et Birger Solberg. 2006. « Bioenergy from the Forest Sector: Economic Potential and Interactions with Timber and Forest Products Markets in Norway ». *Scandinavian Journal of Forest Research* 21 (2): 175-85. <https://doi.org/10.1080/02827580600591216>.
- Fortin, Mathieu, Jean-Baptiste Pichancourt, Lara Climaco de Melo, Antoine Colin, et Sylvain Caurla. 2019. « The Effect of Stumpage Prices on Large-Area Forest Growth Forecasts Based on Socio-Ecological Models ». *Forestry: An International Journal of Forest Research* 92 (3): 339-56. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz016>.
- Fujita, Masahisa, Paul R. Krugman, et Anthony Venables. 1999. *The spatial economy: cities, regions and international trade*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Gamfeldt, Lars, Tord Snäll, Robert Bagchi, Micael Jonsson, Lena Gustafsson, Petter Kjellander, María C. Ruiz-Jaen, et al. 2013. « Higher Levels of Multiple Ecosystem Services Are Found in Forests with More Tree Species ». *Nature Communications* 4 (1): 1340. <https://doi.org/10.1038/ncomms2328>.
- Garcia, S., E. N. Kere, et A. Stenger. 2014. « Econometric Analysis of Social Interactions in the Production Decisions of Private Forest Owners ». *European Review of Agricultural Economics* 41 (2): 177-98. <https://doi.org/10.1093/erae/jbt027>.
- Garcia, Serge, Jens Abildtrup, et Anne Stenger. 2018. « How Does Economic Research Contribute to the Management of Forest Ecosystem Services? » *Annals of Forest Science* 75 (2): 53. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0733-7>.
- Geijer, Erik, Göran Bostedt, et Runar Brännlund. 2011. « Damned If You Do, Damned If You Do Not—Reduced Climate Impact vs. Sustainable Forests in Sweden ». *Resource and Energy Economics* 33 (1): 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2010.01.004>.
- Gemenne, François, Alexandre Magnan, et Laurence Tubiana. 2010. *Anticiper pour s'adapter: le nouvel enjeu du changement climatique*. Paris: Pearson.
- Giovanni, Julian di, Andrei Levchenko, et Isabelle Méjean. 2020. « Foreign Shocks as Granular Fluctuations », 2020, CREST édition.
- Godard, Olivier. 2010. « Cette ambiguë adaptation au changement climatique ». *Natures Sciences Sociétés* 18 (3): 287-97.

- Gourlet-Fleury, Sylvie. 1997. « A spatially-explicit model of the dynamics of a tropical rainforest (Paracou Forest - French Guiana) ». Theses, Université Claude Bernard - Lyon I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00204403>.
- Grossman, Gene, et Alan Krueger. 1994. « Economic Growth and the Environment ». w4634. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w4634>.
- Grossman, Gene M., et Elhanan Helpman. 1991. « Quality Ladders and Product Cycles ». *The Quarterly Journal of Economics* 106 (2): 557. <https://doi.org/10.2307/2937947>.
- Guillon, P. 1974. « Première esquisse de la filière-bois française en 1970 ». *Revue Forestière Française*, n° 4: 259. <https://doi.org/10.4267/2042/20836>.
- Gustavsson, L., J. Holmberg, V. Dornburg, R. Sathre, T. Eggers, K. Mahapatra, et G. Marland. 2007. « Using Biomass for Climate Change Mitigation and Oil Use Reduction ». *Energy Policy* 35 (11): 5671-91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.05.023>.
- Hänninen, Riitta, et A. Kallio. 2007. « Economic impacts on the forest sector of increasing forest biodiversity conservation in Finland ». *Silva Fennica* 41 (3). <https://doi.org/10.14214/sf.286>.
- Hartman, Richard. 1976. « The harvesting decision when a standing forest has value ». *Economic Inquiry* 14 (1): 52-58. <https://doi.org/10.1111/j.1465-7295.1976.tb00377.x>.
- Haszeldine, R. S. 2009. « Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be? ». *Science* 325 (5948): 1647-52. <https://doi.org/10.1126/science.1172246>.
- Helin, Tuomas, Laura Sokka, Sampo Soimakallio, Kim Pingoud, et Tiina Pajula. 2013. « Approaches for Inclusion of Forest Carbon Cycle in Life Cycle Assessment - a Review ». *GCB Bioenergy* 5 (5): 475-86. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12016>.
- Hervé, Jean-Christophe, Stéphanie Wurpillot, Claude Vidal, et Bernard Roman-Amat. 2014. « L'inventaire des ressources forestières en France : un nouveau regard sur de nouvelles forêts ». *Revue Forestière Française*, n° 3: Fr., ISSN 0035. <https://doi.org/10.4267/2042/56055>.
- Hodges, Charles S. 1999. « Heterobasidion Annosum. Biology, Ecology, Impact and Control. S. Woodward, J. Stenlid, R. Karjalainen and A. Hutterman (Eds). 16.5 x 24.5 Cm, 589 Pp. Wallingford, UK: CAB International, 1998. ISBN 085199 275 7 (Hardback). » *Plant Pathology* 48 (4): 564-65. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1999.03666.x>.
- Hotelling, Harold. 1931. « The Economics of Exhaustible Resources ». *Journal of Political Economy* 39 (2): 137-75. <https://doi.org/10.1086/254195>.
- Houpert, A, et Y Botrel. 2015. « Rapport d'information fait au nom de la commission des finances sur l'enquête de la Cour des comptes relative aux soutiens à la filière forêt-bois. » Senat, session ordinaire de 2014-205, No382, 321 p.
- IEDOM. 2019. « Guyane Rapport annuel 2018 ». Technical report 2018. Rapport annuel. 115 rue Réaumur, 75002 PARIS: Institut d'émission des département d'outre-mer.
- Im, Eun Ho, Darius M. Adams, et Gregory S. Latta. 2010. « The Impacts of Changes in Federal Timber Harvest on Forest Carbon Sequestration in Western Oregon ». *Canadian Journal of Forest Research* 40 (9): 1710-23. <https://doi.org/10.1139/X10-110>.
- Insee. 2020. « Définition de filière ». <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1734>.
- Isard, Walter. 1954. « Location Theory and Trade Theory: Short-Run Analysis ». *The Quarterly Journal of Economics* 68 (2): 305. <https://doi.org/10.2307/1884452>.
- ISO. 2006a. « 14040-Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework ». Geneva, Switzerland.
- . 2006b. « 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines ». Geneva, Switzerland.

- Jactel, Hervé, Bruce C. Nicoll, Manuela Branco, José Ramon Gonzalez-Olabarria, Wojciech Grodzki, Bo Långström, Francisco Moreira, et al. 2009. « The Influences of Forest Stand Management on Biotic and Abiotic Risks of Damage ». *Annals of Forest Science* 66 (7): 701-701. <https://doi.org/10.1051/forest/2009054>.
- Johnston, Craig M.T., et G. Cornelis van Kooten. 2014. « Economic Consequences of Increased Bioenergy Demand ». *The Forestry Chronicle* 90 (05): 636-42. <https://doi.org/10.5558/tfc2014-128>.
- Kallio, Markku, Dennis P. Dykstra, Clark Shepard Binkley, et International Institute for Applied Systems Analysis, éd. 1987. *The Global forest sector: an analytical perspective*. Chichester [West Sussex] ; New York: Wiley.
- Kellomäki, Seppo, Harri Strandman, Tero Heinonen, Antti Asikainen, Ari Venäläinen, et Heli Peltola. 2018. « Temporal and Spatial Change in Diameter Growth of Boreal Scots Pine, Norway Spruce, and Birch under Recent-Generation (CMIP5) Global Climate Model Projections for the 21st Century ». *Forests* 9 (3): 118. <https://doi.org/10.3390/f9030118>.
- Koopmans, Tjalling C. 1949. « Optimum Utilization of the Transportation System ». *Econometrica* 17: 136. <https://doi.org/10.2307/1907301>.
- Kooten, G. Cornelis van, et Craig M.T. Johnston. 2016. « The Economics of Forest Carbon Offsets ». *Annual Review of Resource Economics* 8 (1): 227-46. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100815-095548>.
- Kovacs, Kent F., Robert G. Haight, Deborah G. McCullough, Rodrigo J. Mercader, Nathan W. Siegert, et Andrew M. Liebhold. 2010. « Cost of Potential Emerald Ash Borer Damage in U.S. Communities, 2009–2019 ». *Ecological Economics* 69 (3): 569-78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.09.004>.
- Krugman, Paul. 1980. « Scale Economies, Product Differentiation, and the Pattern of Trade ». *The American Economic Review* 70 (5): 950-59.
- Latta, Gregory S., Hanne K. Sjølie, et Birger Solberg. 2013. « A Review of Recent Developments and Applications of Partial Equilibrium Models of the Forest Sector ». *Journal of Forest Economics* 19 (4): 350-60. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2013.06.006>.
- Lecocq, Franck, Sylvain Caurla, Philippe Delacote, Ahmed Barkaoui, et Alexandre Sauquet. 2011. « Paying for Forest Carbon or Stimulating Fuelwood Demand? Insights from the French Forest Sector Model ». *Journal of Forest Economics* 17 (2): 157-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.02.011>.
- Lenglet, Jonathan, et Sylvain Caurla. 2020. « Territorialisation et écologisation dans la filière forêt-bois française : une rencontre fortuite ? » *Développement durable et territoires*, n° Vol. 11, n°1 (avril). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.16645>.
- Lenglet, Jonathan, Jean-Yves Courtonne, et Sylvain Caurla. 2016. « Évaluation et représentation des flux de bois dans la filière ». *Revue Forestière Française*, n° 2. <https://doi.org/10.4267/2042/61870>.
- . 2017. « Material Flow Analysis of the Forest-Wood Supply Chain: A Consequential Approach for Log Export Policies in France ». *Journal of Cleaner Production* 165 (novembre): 1296-1305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.177>.
- Levasseur, Annie, Pascal Lesage, Manuele Margni, Louise Deschênes, et Réjean Samson. 2010. « Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments ». *Environmental Science & Technology* 44 (8): 3169-74. <https://doi.org/10.1021/es9030003>.
- Li, Yanshu, Bin Mei, et Thaïs Linhares-Juvenal. 2019. « The Economic Contribution of the World's Forest Sector ». *Forest Policy and Economics* 100 (mars): 236-53. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.004>.

- Lobianco, Antonello, Sylvain Caurla, Philippe Delacote, et Ahmed Barkaoui. 2016. « Carbon Mitigation Potential of the French Forest Sector under Threat of Combined Physical and Market Impacts Due to Climate Change ». *Journal of Forest Economics* 23 (avril): 4-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.12.003>.
- Lobianco, Antonello, Philippe Delacote, Sylvain Caurla, et Ahmed Barkaoui. 2015. « The Importance of Introducing Spatial Heterogeneity in Bio-Economic Forest Models: Insights Gleaned from FFSM++ ». *Ecological Modelling* 309-310 (août): 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.012>.
- . 2016. « Accounting for Active Management and Risk Attitude in Forest Sector Models: An Impact Study on French Forests ». *Environmental Modeling & Assessment* 21 (3): 391-405. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9483-1>.
- Lopez, Manon. 2016. « Les plantations forestières en Guyane : sont-elles une solution durable à l’approvisionnement bois dans les prochaines années ». Office National des Forêts.
- Loustau, Denis. 2004. « Rapport final du projet CARBOFOR ». <http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/7-01LousteauCraboforRF.pdf>.
- , éd. 2010. *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*. Update Sciences & Technologies. Versailles: Éditions Quae.
- Magnani, Elisabetta. 2000. « The Environmental Kuznets Curve, Environmental Protection Policy and Income Distribution ». *Ecological Economics* 32 (3): 431-43. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00115-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00115-9).
- Malinvaud, Edmond. 1954. « Koopmans (Tjalling C.) ed.- Activity Analysis of Production and Allocation Proceedings of a Conference. » *Revue économique*, 126-28.
- Maréchaux, Isabelle, et Jérôme Chave. 2017. « An individual-based forest model to jointly simulate carbon and tree diversity in Amazonia: Description and applications ». *Ecological Monographs*, juillet. <https://doi.org/10.1002/ecm.1271>.
- Martin, Philip A., Adrian C. Newton, Marion Pfeifer, MinSheng Khoo, et James M. Bullock. 2015. « Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: A meta-analysis ». *Forest Ecology and Management*, Special Section: The characteristics, impacts and management of forest fire in China, 356 (novembre): 224-33. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.010>.
- Mathieu, Valentin. 2019. « Forest Sector Modeling : A Critical Analysis from the Perspective of the Notions of Spaces, Place, and Scale ». Rapport de stage. Nancy: Bureau d’Économie Théorique et Appliquée.
- Mayer, A. L. 2005. « Ecology: Enhanced: Importing Timber, Exporting Ecological Impact ». *Science* 308 (5720): 359-60. <https://doi.org/10.1126/science.1109476>.
- Méjean, Isabelle, Alejandra Martinez, et Elie Gerschel. 2020. « How global value chains became Victims of Covid-19 », 2020, European Financial Revue édition.
- Melitz, Marc J. 2003. « The Impact of Trade on Intra-Industry Reallocations and Aggregate Industry Productivity ». *Econometrica* 71 (6): 1695-1725. <https://doi.org/10.1111/1468-0262.00467>.
- Merry, Frank, Britaldo Soares-Filho, Daniel Nepstad, Gregory Amacher, et Hermann Rodrigues. 2009. « Balancing Conservation and Economic Sustainability: The Future of the Amazon Timber Industry ». *Environmental Management* 44 (3): 395-407. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9337-1>.
- Milcu, Andra Ioana, Jan Hanspach, David Abson, et Joern Fischer. 2013. « Cultural Ecosystem Services: A Literature Review and Prospects for Future Research ». *Ecology and Society* 18 (3): art44. <https://doi.org/10.5751/ES-05790-180344>.

- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2018. « Une stratégie bioéconomie pour la France, plan d'action 2018-2020 ». <https://agriculture.gouv.fr/une-strategie-bioeconomie-pour-la-france-plan-daction-2018-2020>.
- Moiseyev, Alexander, Birger Solberg, Bruce Michie, et A. Maarit I. Kallio. 2010. « Modeling the Impacts of Policy Measures to Prevent Import of Illegal Wood and Wood Products ». *Forest Policy and Economics* 12 (1): 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.09.015>.
- Naudts, K., J. Ryder, M. J. McGrath, J. Otto, Y. Chen, A. Valade, V. Bellasen, et al. 2015. « A Vertically Discretised Canopy Description for ORCHIDEE (SVN R2290) and the Modifications to the Energy, Water and Carbon Fluxes ». *Geoscientific Model Development* 8 (7): 2035-65. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2035-2015>.
- Olsen, Yulia, Jacob Klenø Nøjgaard, Helge Rørdam Olesen, Jørgen Brandt, Torben Sigsgaard, Sara C. Pryor, Travis Ancelet, María del Mar Viana, Xavier Querol, et Ole Hertel. 2020. « Emissions and Source Allocation of Carbonaceous Air Pollutants from Wood Stoves in Developed Countries: A Review ». *Atmospheric Pollution Research* 11 (2): 234-51. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.10.007>.
- Ostwald, Madelene, et Sabine Henders. 2014. « Making Two Parallel Land-Use Sector Debates Meet: Carbon Leakage and Indirect Land-Use Change ». *Land Use Policy* 36 (janvier): 533-42. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.09.012>.
- Pearce, David W. (David William), et Jeremy J. Warford. 1993. *World without end: economics, environment, and sustainable development*. New York, N.Y: Published for the World Bank [by] Oxford University Press.
- Petucco, Claudio, Jens Abildtrup, et Anne Stenger. 2015. « Influences of Nonindustrial Private Forest Landowners' Management Priorities on the Timber Harvest Decision—A Case Study in France ». *Journal of Forest Economics* 21 (3): 152-66. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.07.001>.
- Petucco, Claudio, Antonello Lobianco, et Sylvain Caurla. 2020. « Economic Evaluation of an Invasive Forest Pathogen at a Large Scale: The Case of Ash Dieback in France ». *Environmental Modeling & Assessment* 25 (1): 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09661-1>.
- Peyron, Jean-Luc, et Jacques Maheut. 1999. « Les Fondements de l'économie forestière moderne : le rôle capital de Faustmann, il y a 150 ans, et celui de quelques-uns de ses précurseurs et successeurs. » *Revue Forestière Française*, n° 6: 679. <https://doi.org/10.4267/2042/5479>.
- Pinagé, Ekena, Michael Keller, Paul Duffy, Marcos Longo, Maiza Dos Santos, et Douglas Morton. 2019. « Long-Term Impacts of Selective Logging on Amazon Forest Dynamics from Multi-Temporal Airborne LiDAR ». *Remote Sensing* 11 (mars). <https://doi.org/10.3390/rs11060709>.
- Piou, Dominique, et Hervé Jactel. 2010. « L'avenir du massif forestier des Landes de Gascogne. Rapport d'expertise sur l'évaluation des risques biotiques ». <http://landes.gip-ecofor.org/data/RFC40310.pdf>.
- PIPAME. 2013. « Relocalisations d'activités industrielles en France: revue de littérature ». DGCIS Prospective.
- Plas, Fons van der, Peter Manning, Eric Allan, Michael Scherer-Lorenzen, Kris Verheyen, Christian Wirth, Miguel A. Zavala, et al. 2016. « Jack-of-All-Trades Effects Drive Biodiversity–Ecosystem Multifunctionality Relationships in European Forests ». *Nature Communications* 7 (1): 11109. <https://doi.org/10.1038/ncomms11109>.
- Quinet, Alain. 2019. « The Value for Climate Action A Shadow Price of Carbon for Evaluation of Investments and Public Policies Report by the Commission Chaired by Paris ».
- Reyer, Christopher P O, Stephen Bathgate, Kristina Blennow, Jose G Borges, Harald Bugmann, Sylvain Delzon, Sonia P Faias, et al. 2017. « Are forest disturbances amplifying or canceling out climate

- change-induced productivity changes in European forests? » *Environmental Research Letters* 12 (3): 034027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ef1>.
- Riviere, Miguel, et Sylvain Caurla. 2020a. « Representations of the forest sector in economic models ». *Oeconomia*, 2020.
- . 2020b. « Landscape Implications of Managing Forests for Carbon Sequestration ». *Forestry: An International Journal of Forest Research*, juin, cpaa015. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa015>.
- Riviere, Miguel, Sylvain Caurla, et Philippe Delacote. 2020. « Evolving Integrated Models From Narrower Economic Tools: The Example of Forest Sector Models ». *Environmental Modeling & Assessment*, mars. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09706-w>.
- Rougieux, Paul. 2017. « Modelling European Forest Products Consumption and Trade in a Context of Structural Chang ». Université de Lorraine.
- Roux, Alice, Jean-François Dhôte, David Achat, Claire Bastick, Antoine Colin, Alain Bailly, Jean-Charles Bastien, et al. 2017. « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050 ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20800.12805>.
- Samuelson, Paul A. 1952. « Spatial Price Equilibrium and Linear Programming ». *The American Economic Review* 42 (3): 283-303.
- Sathre, Roger, et Jennifer O'Connor. 2010. « Meta-Analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution ». *Environmental Science & Policy* 13 (2): 104-14. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>.
- Schuppe, Pauline. 2019. « Perception du changement climatique chez les gestionnaires forestiers du Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges ». Rapport de stage, Museum National d'Histoire Naturelle Master Évolution, Patrimoine Naturel et Sociétés. <https://afforball-psdr4.fr/etudier-la-perception-des-risques-chez-les-proprietaires-forestiers/>.
- Seely, Brad, Clive Welham, et Kim Scoullar. 2015. « Application of a Hybrid Forest Growth Model to Evaluate Climate Change Impacts on Productivity, Nutrient Cycling and Mortality in a Montane Forest Ecosystem ». Édité par Lucas C.R. Silva. *PLOS ONE* 10 (8): e0135034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135034>.
- Sekkat, Kh. 1987. « Filières de production : revue de la littérature et comparaison avec la théorie néo-classique ». *L'Actualité économique* 63 (1): 118. <https://doi.org/10.7202/601403ar>.
- Sergent, Arnaud, Bas Arts, et Peter Edwards. 2018. « Governance Arrangements in the European Forest Sector: Shifts towards 'New Governance' or Maintenance of State Authority? » *Land Use Policy* 79 (décembre): 968-76. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.036>.
- Sjølie, Hanne K., Greg S. Latta, et Birger Solberg. 2013. « Potentials and Costs of Climate Change Mitigation in the Norwegian Forest Sector — Does Choice of Policy Matter? » *Canadian Journal of Forest Research* 43 (6): 589-98. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0457>.
- . 2014. « Impacts of the Kyoto Protocol on Boreal Forest Climate Change Mitigation ». *Annals of Forest Science* 71 (2): 267-77. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0289-5>.
- Sjølie, Hanne K., Erik Trømborg, Birger Solberg, et Torjus F. Bolkesjø. 2010. « Effects and Costs of Policies to Increase Bioenergy Use and Reduce GHG Emissions from Heating in Norway ». *Forest Policy and Economics* 12 (1): 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.08.011>.
- Sohnngen, Brent, Robert Mendelsohn, et Roger Sedjo. 1999. « Forest Management, Conservation, and Global Timber Markets ». *American Journal of Agricultural Economics* 81 (1): 1-13. <https://doi.org/10.2307/1244446>.
- Solberg, Birger. 1986. « Forest sector simulation models as methodological tools in forest policy analysis. » *Silva Fennica* 20 (4). <https://doi.org/10.14214/sf.a27757>.

- Solberg, Birger, Alexander Moiseyev, et A. Maarit I. Kallio. 2003. « Economic Impacts of Accelerating Forest Growth in Europe ». *Forest Policy and Economics* 5 (2): 157-71. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00022-4).
- Sorrell, Steve, John Dimitropoulos, et Matt Sommerville. 2009. « Empirical Estimates of the Direct Rebound Effect: A Review ». *Energy Policy* 37 (4): 1356-71. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.026>.
- Souty, F., T. Brunelle, P. Dumas, B. Dorin, P. Ciais, R. Crassous, C. Müller, et A. Bondeau. 2012. « The Nexus Land-Use Model Version 1.0, an Approach Articulating Biophysical Potentials and Economic Dynamics to Model Competition for Land-Use ». *Geoscientific Model Development* 5 (5): 1297-1322. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1297-2012>.
- Sturrock, R. N., S. J. Frankel, A. V. Brown, P. E. Hennon, J. T. Kliejunas, K. J. Lewis, J. J. Worrall, et A. J. Woods. 2011. « Climate Change and Forest Diseases: Climate Change and Forest Diseases ». *Plant Pathology* 60 (1): 133-49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>.
- Sun, Lili, et Bryan E.C. Bogdanski. 2017. « Trade Incentives for Importers to Adopt Policies to Address Illegally Logged Timber: The Case of Non-Tropical Hardwood Plywood ». *Journal of Forest Economics* 27 (avril): 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.01.003>.
- Suter, Florian, Bernhard Steubing, et Stefanie Hellweg. 2017. « Life Cycle Impacts and Benefits of Wood along the Value Chain: The Case of Switzerland: Life Cycle Impacts and Benefits of Wood ». *Journal of Industrial Ecology* 21 (4): 874-86. <https://doi.org/10.1111/jiec.12486>.
- Takayama, T., et G. G. Judge. 1964. « Spatial Equilibrium and Quadratic Programming ». *Journal of Farm Economics* 46 (1): 67. <https://doi.org/10.2307/1236473>.
- Ter-Mikaelian, Michael T., Stephen J. Colombo, et Jiabin Chen. 2015. « The Burning Question: Does Forest Bioenergy Reduce Carbon Emissions? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting ». *Journal of Forestry* 113 (1): 57-68. <https://doi.org/10.5849/jof.14-016>.
- Thom, Dominik, Werner Rammer, Rita Garstenauer, et Rupert Seidl. 2018. « Legacies of Past Land Use Have a Stronger Effect on Forest Carbon Exchange than Future Climate Change in a Temperate Forest Landscape ». *Biogeosciences* 15 (18): 5699-5713. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5699-2018>.
- Tian, Hanqin, Chaoqun Lu, Jia Yang, Kamaljit Banger, Deborah N. Huntzinger, Christopher R. Schwalm, Anna M. Michalak, et al. 2015. « Global Patterns and Controls of Soil Organic Carbon Dynamics as Simulated by Multiple Terrestrial Biosphere Models: Current Status and Future Directions: Modeling Global Soil Carbon Dynamics ». *Global Biogeochemical Cycles* 29 (6): 775-92. <https://doi.org/10.1002/2014GB005021>.
- Tollefson, Jeff. 2017. « The Wooden Skyscrapers That Could Help to Cool the Planet ». *Nature* 545 (7654): 280-82. <https://doi.org/10.1038/545280a>.
- Trømborg, Erik, Torjus Folsland Bolkesjø, et Birger Solberg. 2007. « Impacts of Policy Means for Increased Use of Forest-Based Bioenergy in Norway—A Spatial Partial Equilibrium Analysis ». *Energy Policy* 35 (12): 5980-90. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.004>.
- Unruh, Gregory C. 2000. « Understanding Carbon Lock-In ». *Energy Policy* 28 (12): 817-30. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).
- Valade, Aude, Valentin Bellassen, Claire Magand, et Sebastiaan Luyssaert. 2017. « Sustaining the Sequestration Efficiency of the European Forest Sector ». *Forest Ecology and Management* 405 (décembre): 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.009>.
- Valade, Aude, Sebastiaan Luyssaert, Patrick Vallet, Sylvestre Njakou Djomo, Ingridé Jesus Van Der Kellen, et Valentin Bellassen. 2018. « Carbon Costs and Benefits of France's Biomass Energy Production Targets ». *Carbon Balance and Management* 13 (1): 26. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0113-5>.

- Werner, Frank, Ruedi Taverna, Peter Hofer, et Klaus Richter. 2005. « Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates ». *Annals of Forest Science* 62 (8): 889-902. <https://doi.org/10.1051/forest:2005080>.
- Wernsdörfer, Holger, Antoine Colin, Jean-Daniel Bontemps, Hélène Chevalier, G r me Pignard, Sylvain Caurla, Jean-Michel Leban, Jean-Christophe Herv , et Meriem Fournier. 2012. « Large-Scale Dynamics of a Heterogeneous Forest Resource Are Driven Jointly by Geographically Varying Growth Conditions, Tree Species Composition and Stand Structure ». *Annals of Forest Science* 69 (7): 829-44. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0196-1>.
- White, Eric M., Greg Latta, Ralph J. Alig, Kenneth E. Skog, et Darius M. Adams. 2013. « Biomass Production from the U.S. Forest and Agriculture Sectors in Support of a Renewable Electricity Standard ». *Energy Policy* 58 (juillet): 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.029>.
- Yemshanov, Denys, Daniel W. McKenney, Peter de Groot, Dennis Haugen, Derek Sidders, et Brent Joss. 2009. « A Bioeconomic Approach to Assess the Impact of an Alien Invasive Insect on Timber Supply and Harvesting: A Case Study with *Sirex Noctilio* in Eastern Canada ». *Canadian Journal of Forest Research* 39 (1): 154-68. <https://doi.org/10.1139/X08-164>.
- Yguel, Benjamin, Camille Piponiot, Ariane Mirabel, Aur lie Dourdain, Bruno Herault, Sylvie Gourlet-Fleury, Pierre-Michel Forget, et Colin Fontaine. 2018. « Beyond species richness and biomass: Impact of selective logging and silvicultural treatments on the functional composition of a neotropical forest ». *Forest Ecology and Management* 433 (novembre): 528-34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.022>.
- Yu, Bing, Xiao Li, Lei Shi, et Yi Qian. 2015. « Quantifying CO2 Emission Reduction from Industrial Symbiosis in Integrated Steel Mills in China ». *Journal of Cleaner Production* 103 (septembre): 801-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.015>.