



*The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library*

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

*No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.*

# La validation des modèles de simulation-prospective

## Panorama des méthodes et applications aux modèles de secteur forêt-bois

**Sylvain Caurla**

UMR BETA, Université de Lorraine, CNRS, INRAE, AgroParisTech,  
Chaire énergie & prospérité, Nancy, France

**Philippe Delacote**

(auteur de correspondance)

BETA, Université de Lorraine, CNRS, INRAE, AgroParisTech,  
Chaire économie du Climat, Nancy, France [philippe.delacote@inrae.fr](mailto:philippe.delacote@inrae.fr)

**Miguel Rivière**

Université Paris-Saclay, AgroParisTech, CNRS, Ecole des Ponts  
ParisTech, CIRAD, EHESS, UMR CIREN,  
94130 Nogent-sur-Marne, France

### Les modèles d'évaluation intégrée : outils pluridisciplinaires d'analyse prospective

Un modèle d'évaluation intégrée peut se définir comme la représentation logique, mathématique et programmatique d'un système complexe comprenant des dynamiques de natures différentes (ex. économiques, écologiques, technologiques) via des approches issues de plusieurs disciplines, le plus souvent les sciences économiques et les sciences de l'environnement. Le terme anglais *Integrated Assessment Model* (IAM) est couramment utilisé pour les modèles intégrés du système énergie-climat, mais ces derniers existent aussi pour d'autres secteurs tels que l'agriculture, la pêche ou la forêt. Ces outils comportent, d'une part une représentation simplifiée d'une économie, basées sur des concepts théoriques (comme les équilibres de marché) et des estimations empiriques (économétrie) et, d'autre part, une représentation simplifiée de mécanismes environnementaux faisant appel à des approches statistiques ou basées sur les processus (c'est à dire basés sur des hypothèses explicites, tirées de la compréhension théorique des phénomènes écologiques).

A l'interface de l'analyse économique et environnementale, ces modèles ont pour objectif d'éclairer les décideurs publics en explorant les possibles évolutions du système qu'ils représentent. Les analyses consistent à explorer et comparer divers scénarios, c'est à dire des récits plausibles exprimés en langage quantitatif et qualitatif, souvent à moyen ou long terme (décennies, siècle), au travers de simulations numériques. Il n'est donc pas question de prédiction, mais bien de prospective, d'exploration sur la manière dont certains changements pourraient impacter le système modélisé, dans l'optique d'informer la prise de décision actuelle selon une logique proactive. En d'autres termes, ils permettent de réaliser des expériences sur un système idéalisé, le « monde dans le modèle » (Morgan, 2012).

Dans ce cadre, la question de la validation se pose fréquemment. Quel crédit accorder aux projections issues de ces modèles ? Il est souvent suggéré de comparer les résultats de simulation aux données réelles

**L**a validation des modèles d'évaluation intégrée constitue un défi important de la recherche pluri- et interdisciplinaire. Nous montrons ici que les méthodes de validation, souvent résumées à une comparaison entre résultats des modèles et données réelles passées, sont complexes et variées et que, dans le cas de modèles dont l'objectif est de porter un éclairage prospectif sur le long terme, la validation ne peut être réduite aux méthodes de comparaison. Pour illustrer nos propos, nous appliquons notre réflexion aux modèles de simulation bioéconomiques de la filière forêt-bois.

observées sur une période passée. Un modèle « valide » serait donc capable de reproduire fidèlement une réalité connue. Nous montrons ici que cette acception n'est pas forcément la plus appropriée dans le cadre des modèles de prospective, pour lesquels la validation recouvre un éventail plus large de définitions et de méthodologies associées.

## La validation des modèles de simulation

Sargent (2013) définit la validation comme « la justification qu'un modèle, sur son domaine d'application, présente un niveau de précision satisfaisant et cohérent avec l'utilisation souhaitée ». La validation ne s'évalue donc pas de manière absolue, mais relativement aux usages visés. Un modèle de prospective cherchant à explorer les possibles ne sera donc pas évalué selon les mêmes critères qu'un modèle cherchant à prédire ou à affecter des probabilités aux différents résultats.

La validation d'un modèle de simulation recoupe un vaste ensemble d'étapes et de méthodes, dont celles basées sur la comparaison ne forment qu'une partie.

En premier lieu, la **validation conceptuelle** pose la question de la cohérence entre le modèle conceptuel (sous forme logique) et les théories sur lesquelles il se base pour représenter le système modélisé. En d'autres termes, le modèle mobilise-t-il à bon escient les théories sur lesquelles il est construit ?

Ensuite, la **validation de la théorie** pose la question de l'adéquation entre les théories mobilisées et la réalité. Par exemple, la dimension économique des modèles de prospective requiert que la théorie économique invoquée corresponde à des comportements observés. Pour cela, le calibrage par le biais d'outils économétriques constitue un point d'entrée, dans la mesure où elle permet d'estimer des coefficients qui correspondent aux observations. Il est cependant à noter que les modèles prospectifs font aussi usage de théories non validées par des résultats empiriques. On parle alors de théories proposées, qui sont souvent issues de considérations intuitives ou de dires d'experts.

La **validation interne**, ou **vérification**, pose la question de la bonne traduction du modèle conceptuel en code informatique dans un langage de programmation. Dit autrement, la programmation suit-elle bien la logique prévue du modèle ?

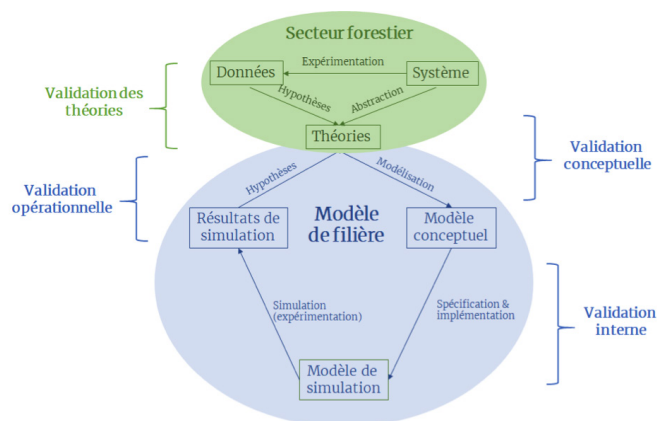
Finalement, la **validation opérationnelle** consiste à déterminer si les sorties du modèle sont satisfaisantes eu égard, d'une part, à l'objectif du modèle et, d'autre part, au domaine d'applicabilité prévu du modèle. Elle pose ainsi la question de la cohérence des résultats de simulation numérique avec (1) les théories mobilisées par le modèle et (2) les observations dans le monde réel.

La validation des modèles de simulation comporte ainsi plusieurs facettes et, en conséquence, de nombreuses méthodes sont mobilisables pour l'effectuer. Dans ce cadre, celles basées sur la comparaison des résultats de simulation à des observations passées ne constituent qu'une partie des méthodes disponibles pour la validation opérationnelle. À partir de ce constat, nous faisons le point sur la manière dont un type de modèle intégré particulier, les modèles de secteur forêt bois (MSF) sont validés.

## La validation des modèles de secteur forêt-bois

Les MSF sont des outils d'analyse bio-économique qui combinent une modélisation de l'évolution temporelle (et souvent spatiale) de la ressource en bois, des industries de transformation et des marchés du bois. Ils permettent de simuler à la fois l'évolution des ressources forestières et de leur exploitation, et les équilibres quantité/prix sur les marchés du bois. Ces derniers ont été développés depuis les

**Figure 1 : Les étapes de la validation d'un modèle de simulation, adapté de Sargent (2013).**



**Note :** Les sections en vert se réfèrent au « monde réel » et relèvent du travail de recherche empirique. Les sections en bleu se réfèrent au « monde dans le modèle » et relèvent du travail du modélisateur.

années 1970 dans la plupart des grands pays forestiers européens et nord-américains, pour des échelles allant de la grande région au monde entier. En France, le modèle FFSM (*French Forest Sector Model*) est développé à l'UMR BETA à Nancy depuis 2008 et a été utilisé pour évaluer les impacts potentiels de politiques publiques liées à l'atténuation du changement climatique (taxe carbone, subvention à la bioénergie, compensation carbone en forêt) ainsi que les conséquences de chocs environnementaux (tempêtes, pathogènes, feux de forêt).

La validation conceptuelle des MSF est réalisée par l'équipe développant le modèle, le plus souvent composée de chercheurs en économie, sciences forestières et mathématiques appliquées. Ces derniers sont des experts scientifiques maîtrisant les théories issues de leurs champs respectifs, et sont capables de s'assurer de leur bon usage. Les équipes de modélisation associent aussi des experts techniques (comme l'inventaire forestier national) qui s'assurent de la bonne utilisation des éléments empiriques. Les MSF étant des modèles de recherche, la validation conceptuelle est également effectuée par les pairs (soumission d'articles, conférences, etc.), les modèles étant le plus souvent présentés sous forme logique dans les publications, et donc soumis à la critique par les pairs.

La validation des théories concerne majoritairement le travail d'empiristes (écologues, économètres) travaillant sur le système « réel ». Cependant, il est courant pour les équipes de modélisation de participer à la validation des théories qui ne le sont pas encore (théories proposées). Par exemple, dans le cas du FFSM, les élasticités *Armington*, utilisées pour traduire la substituable imparfaite entre produits-bois français et étrangers, ont été estimées par les modélisateurs. En revanche, la validation de la représentation de la croissance forestière selon un modèle d'inventaire par classe de diamètres a été du ressort d'écologues associés au projet (UMR SILVA, IGN et UMR LIF).

Les équipes de recherche comprennent typiquement une ou plusieurs personnes spécialisées en programmation/développement, chargées de mettre en œuvre le modèle informatiquement, de le tester et d'en assurer la maintenance. La validation interne est alors assurée par le suivi des standards courants en matière de développement de code informatique et par des étapes de *tracing/debugging*, mais aussi par des échanges réguliers avec les concepteurs et utilisateurs du modèle.

## Encadré 1 :

### ANALYSE PROSPECTIVE ET AIDE À LA DÉCISION

Le commanditaire d'une étude pour l'aide à la décision est souvent en attente de résultats chiffrés permettant d'établir une prédiction. Dans ce cadre, l'utilisation des MSF nécessite plusieurs garde-fous. En particulier, la fascination dont les résultats chiffrés font l'objet présente un double danger : celui d'utiliser le modèle pour ce qu'il n'est pas, d'une part, et celui de ne pas le considérer pour ce qu'il est, d'autre part. Une illustration est ici donnée en référence aux travaux effectués lors de l'expertise INRA-IGN sur le rôle des forêts et de la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique (Roux et al., 2017). Lors de cette étude, FFSM était utilisé pour calculer, entre autres, les coûts liés à deux scénarios pour la filière forêt-bois française. Ces deux scénarios consistaient, schématiquement, en une « extensification » ou une « intensification » des récoltes forestières. Les simulations de ces deux scénarios avec FFSM ont montré que, si la stratégie d'intensification de la gestion forestière présentait des avantages tant en matière

de gains économiques que d'emplois pour la filière, un montant important de subventions directes était nécessaire pour y parvenir. Les montants calculés de ces subventions étaient tels (plus de 6 milliards €/an) qu'ils ont parfois fait l'objet de crispation dans les discussions avec les instances de décision. En réalité, dans ce cas, le véritable résultat n'était pas tant cette valeur considérée dans l'absolu mais bien cette valeur rapportée aux hypothèses du modèle, en particulier au fait que FFSM considère une structure industrielle fixe et ne permet pas d'éviter les effets d'aubaine au niveau du consommateur. Ainsi, le « véritable » résultat du modèle pouvait s'énoncer comme suit : il est économiquement difficile d'atteindre les objectifs de niveau de prélèvements fixés dans le scénario « intensification » sans modification de la structure industrielle et des comportements des acteurs. Ce résultat suit la logique des théories économiques sous-jacentes et, à ce titre, constitue un élément de validation des théories sur lesquelles le modèle est construit.

La réalisation de simulations-tests permet de vérifier que les résultats vont dans le sens prédit par la théorie. Dans une optique de science ouverte et de facilitation de la répliquabilité des résultats, les codes sont de plus en plus souvent disponibles en ligne sur des sites dédiés. Pour le FFSM par exemple, un site internet interactif permet de naviguer dans le code, et l'approche en *open source* (génération de la documentation Doxygen) permet de rendre transparente et accessible la documentation du code.

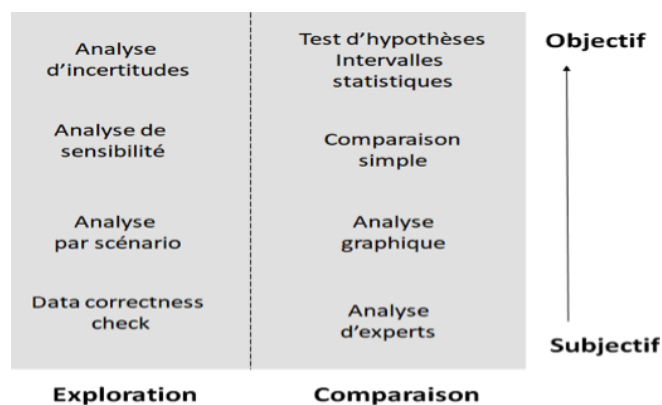
Les méthodes de validation opérationnelle peuvent être catégorisées selon deux critères :

1. Les méthodes d'exploration considèrent les résultats de simulations seuls, alors que les méthodes de comparaison les considèrent au regard d'autre chose (par exemple des données passées).
2. Les méthodes subjectives (ou qualitatives) s'intéressent à la direction et à l'ordre de grandeur des résultats, et principalement basées sur le dire d'expert, alors que les méthodes objectives (ou quantitatives) s'intéressent aux valeurs précises des résultats et font appel à des tests d'hypothèse ou des mesures de performances quantifiées.

Dans le cas des MSF, les méthodes d'exploration sont utilisées de manière systématique. Les plus courantes sont la vérification de la justesse des données (*data correctness check*), c'est à dire vérifier que les simulations concordent avec ce que prévoit la théorie, et l'analyse de scénario, où plusieurs scénarios (comme des politiques publiques au design différent) sont simulés et leurs résultats comparés. Pour ce qui est des méthodes objectives, l'analyse de sensibilité réduite (portant sur les paramètres d'intérêt pour la question posée, par exemple) est quasi-systématique. Les analyses de sensibilité globales et exhaustives (c'est-à-dire portant sur un grand nombre de paramètres et leurs interactions) sont plus difficiles à réaliser compte tenu de la taille des modèles, mais ces dernières se multiplient depuis 10 ans. Les analyses d'incertitude sont plus délicates à réaliser au vu de la nature déterministe de la plupart des modèles. Même si de rares exemples sont à noter, cet aspect est à améliorer.

Les méthodes de comparaison sont également utilisées. Le plus souvent, il s'agit de méthodes subjectives (à dire d'experts : modélisateurs, partenaires opérationnels et pairs extérieurs) ou semi-objectives (p. ex. confrontations de valeurs ou analyses graphiques). Ces comparaisons sont communément établies par rapport à la littérature scientifique existante (résultats d'études similaires) et, lorsque cela est possible, par rapport à des données observées. Cependant, le système modélisé reste difficilement observable en raison de sa taille (une filière) et des horizons de temps longs propres à la forêt. En outre, les données empiriques sont souvent hétérogènes, incomplètes, et disponibles sur une durée limitée, ce qui limite les exercices de comparaison en période historique. L'objet d'étude étant une filière dans son ensemble, la comparaison à des résultats d'expérimentation est impossible.

**Figure 2 :** Quelques méthodes de validation opérationnelle par exploration et comparaison, selon un gradient objectif/subjectif



## Encadré 2 :

### QUELQUES EXEMPLES DE MÉTHODES DE VALIDATION EMPLOYÉES DANS LES MSF

	Méthode	Articles
Comparaison	Comparaison inter-modèles	Daigneault et al. (2020) Sjolie et al (2015) Lobianco et al (2015)
	Comparaison en période historique	Buongiorno et Zhu (2003) Mendelsohn et Sohngen (2019) Caurla et al (2015)
Exploration	Analyse par scénarios	Daigneault et Favero (2021) Buongiorno et al (2011) Caurla et al (2013) Sjolie et al (2015)
	Analyse de sensibilité (réduite)	Austin et al (2020)
	Analyse de sensibilité/ incertitudes (poussée)	Sohngen et al (2019) Kallio (2010) Buongiorno (2018)

#### Références :

Sohngen B., Salem M.E., Baker J.S., Shell M.J. et Kim S.J. (2019). The influence of parametric uncertainty on projections of forest land use, carbon, and markets. *Journal of forest economics*, 34, 129.  
Sjolie H.K., Latta G.S., Trømborg E., Bolkesjø T.F. et Solberg B. (2015). An assessment of forest sector modeling approaches: conceptual differences and

quantitative comparison. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(1), 60-72.  
Lobianco A., Delacote P., Caurla S. et Barkaoui A. (2015). The importance of introducing spatial heterogeneity in bio-economic forest models: Insights gleaned from FFSM+. *Ecological Modelling*, 309, 82-92.  
Mendelsohn R. et Sohngen B. (2019). The net carbon emissions from historic land use and land use change. *Journal of Forest Economics*, 34(3-4), 263-283.  
Kallio A.M.I. (2010). Accounting for uncertainty in a forest sector model using Monte Carlo simulation. *Forest Policy and Economics*, 12(1), 9-16.  
Caurla S., Garcia S. et 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.  
Buongiorno J. et Johnston C. (2018). Effects of parameter and data uncertainty on long-term projections in a model of the global forest sector. *Forest policy and economics*, 93, 10-17.  
Daigneault A.J., Baker J.S. et Favero A. (2020). A forest model inter-comparison project (For-MIP) to assess the future of forests under climate, policy and technological stressors.  
Buongiorno J., Zhu S., Zhang D., Turner J. et Tomberlin D. (2003). *The global forest products model: structure, estimation, and applications*. Elsevier.  
Daigneault A. et Favero A. (2021). Global forest management, carbon sequestration and bioenergy supply under alternative shared socioeconomic pathways. *Land Use Policy*, 103, 105302.  
Buongiorno J., Raunikar R. et Zhu S. (2011). Consequences of increasing bioenergy demand on wood and forests: An application of the Global Forest Products Model. *Journal of Forest Economics*, 17(2), 214-229.  
Sjolie H.K., Latta G.S. et Solberg B. (2016). Combining backcasting with forest sector projection models to provide paths into the future bio-economy. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(7), 708-718.  
Caurla S., Delacote P., Lecocq F., Barthès J. et 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.  
Austin K.G., Baker J.S., Sohngen B.L., Wade C.M., Daigneault A., Ohrel S.B., Ragnauth S. et Bean A. (2020). The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change. *Nature communications*, 11(1), 1-9.

### Limites et recommandations

Les exercices de validation des MSF, et plus généralement des modèles de simulation prospective, sont donc de natures et d'objectifs variés. En effet, ces modèles combinent soubassements théoriques et empiriques, démarche computationnelle et exploration des futurs possibles, et ce dans une optique pluri- voire interdisciplinaire. De la théorie au modèle, du modèle à sa mise en place numérique, de sa mise en place aux simulations, et des simulations à la comparaison de futurs possibles, la robustesse de chacune de ces connexions se doit d'être explorée.

Dans ce cadre, il nous semble que les MSF sont aujourd'hui raisonnablement validés sur le cadran objectif/subjectif et exploration/comparaison, compte tenu de l'utilisation qui en est faite dans un cadre de recherche prospective, et des limites techniques actuelles (computationnelles et de données notamment). Le point faible de la validation se situe au niveau de ce que nous avons appelé la validation opérationnelle, notamment au travers des méthodes de comparaison sur des données passées. Néanmoins, il est essentiel de comprendre que les dynamiques de très long terme et les nombreuses variables qui sont représentées rendent ce type de validation difficile, d'autant plus que les données nécessaires, n'existent souvent, tout simplement pas.

En matière de recommandations, on peut mettre en avant la nécessité de mener des analyses de sensibilité plus complètes, plus systématiques de ces modèles, afin d'obtenir une image plus fine de leur domaine d'application. Les progrès dans les capacités de calcul des outils computationnels permettent en bonne partie de lever ces verrous techniques. Ces exercices nécessitent également un type de chercheurs particuliers et relativement rare, mêlant compétences

disciplinaires et pluridisciplinaires, autour de profils de type ingénieur.

Pour finir, on peut aussi souligner que, dans une certaine mesure, les modèles de simulation prospective sont eux-mêmes des instruments de validation de certaines théories sur lesquelles ils sont construits, notamment celles qui ne sont pas ou partiellement validées.

### Pour aller plus loin

**Caurla S., Bertrand V., Delacote P., et Le Cadre E. (2018).** Heat or power: How to increase the use of energy wood at the lowest cost? *Energy Economics*, 75(C), 85-103.

**Delacote P., Lobianco A., Caurla S., Bontemps J.-D., Lungarska A., Mérian P., Rivière M. et Barkaoui A. (2021).** The loop effect: how climate change impacts the mitigation potential of the french forest sector. *Journal of Forest Economics*, 36.

**Morgan, M.S. (2012).** *The world in the model: How economists work and think*. Cambridge University Press.

**Riviere M., Caurla S. et Delacote P. (2020).** Evolving integrated models from narrower economic tools; the example of forest sector models. *Environmental Modeling & Assessment*, 25, 453-469 <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09706-w>.

**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. et 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)

**Sargent R.G. (2013).** Verification and validation of simulation models, *Journal of Simulation* 7, 12-24.