

Diagramme de Sankey de la filière forêt-bois française : l'enjeu des incertitudes et de la fin de vie des produits

BOUTIN Alexis^{1,2,3}, VENTURA Anne¹, MICHAUD Franck², FRANÇOIS Cyrille⁴

¹ ESB, LIMBHA, Nantes, France,

² Univ Gustave Eiffel, MAST-GPEM, Bouguenais, France,

³ Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Angers, France

⁴ ENTPE, LAET, Vaulx-en-Velin, France

alexis.boutin@esb-campus.fr

Mots clés : Analyse de flux de matière ; Analyse de filière ; Forêt-bois ; Incertitude

Contexte et objectifs

Dans un contexte de réchauffement climatique, les produits biosourcés sont vus comme un moyen de décarboner l'industrie et sont au cœur des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, grâce à leur capacité à absorber le dioxyde de carbone de l'atmosphère par photosynthèse au fur et à mesure que les plantes poussent. Parmi les ressources biologiques, le bois occupe une place centrale. Les secteurs de la construction et de l'énergie sont particulièrement dépendants des produits du bois, ce qui entraîne une augmentation de la demande et une pression sur les ressources. Ces tendances ont été soutenues sur la base d'analyses du cycle de vie (ACV) des produits bois utilisant la modélisation conséquentielle afin d'évaluer les effets du remplacement des produits issus des ressources fossiles par des produits du bois (Stubenrauch et Garske 2023, Miettinen et Ollikainen 2024). Ces modèles conséquentiels sont généralement basés sur des scénarios ou sur des modèles économiques d'équilibre partiel (ou général), supposant des variations marginales et faibles, une demande sans contrainte et des lois linéaires (soit une substitution complète pour les scénarios, soit une élasticité des prix pour les modèles économiques) (Udisi et Gorgolewski 2025, Brandão et al 2024, Schaubroeck 2023). Par conséquent, la massification d'un produit ou d'une technologie ne peut être évaluée, car ces modèles ne peuvent pas prendre en compte les effets d'une demande potentiellement limitée en raison de la disponibilité d'une ressource. Les ACV des produits du bois ne sont donc pas suffisantes pour rendre compte de la question de la gestion des ressources en bois.

L'analyse de flux de matières (AFM) est une méthode qui analyse les échanges entre les processus et les stocks interconnectés dans un système défini par des limites spatiales et temporelles (Brunner et Rechberger 2003). L'AFM est utile et largement utilisée pour la gestion des ressources au niveau territorial (Cerceau et al 2018). Elle peut ainsi être utilisée pour évaluer la pression exercée sur les ressources forestières par le secteur de l'industrie du bois. Le présent article se concentre sur ce sujet à l'échelle du territoire métropolitain français.

Plusieurs études AFM de l'industrie française du bois ont déjà été réalisées. Elles couvrent différentes périodes, différentes activités du secteur de l'industrie du bois et s'appuient sur différents types de données. La première étude a été réalisée dans le cadre du projet AF Filières (Courtonne et al 2019), de 2017 à 2019. Cette étude ne tient pas compte de la fin de vie des produits et reste à un niveau très agrégé. Ses résultats ont ensuite été réutilisés et désagrégés dans le cadre du projet ADEME BACCFIRE (2022-2025). Parallèlement à ces travaux, Carbone 4 a réalisé une cartographie du secteur, publiée en 2024. Contrairement aux études décrites ci-dessus, celle-ci s'est davantage appuyée sur des entretiens avec des acteurs du secteur

que sur des statistiques publiques pour construire des scénarios prospectifs d'évolution du secteur (Aulanier et al 2024). La FCBA a également publié un diagramme de Sankey des flux et stocks de carbone du secteur dans l'étude DispoBois en 2024 (Vial 2024). La FCBA a également développé le modèle Veille Economique Mutualisée, un outil présentant des données détaillées, mais basé sur les flux économiques avec une méthodologie différente (Bailly 2019).

La présente étude vise à inventorier tous les flux de produits bois ou issus du bois transitant dans la filière forêt-bois métropolitaine pour l'année 2021. Par rapport aux études précédentes, cette étude considère la phase de fin de vie plus en détails, ce qui permet d'identifier les boucles de recyclage et le degré de circularité de la filière.

Dans un diagramme de Sankey, les largeurs des flux correspondent au milieu de la distribution gaussienne, mais l'affichage de l'incertitude associée n'est pas visible. Les données AFM sont souvent présentées brutes, sans informations sur la fiabilité des chiffres, ce qui peut conduire à des interprétations erronées. Or, les incertitudes associées peuvent être assez élevées. Ces incertitudes doivent toujours accompagner les données présentées, dans la mesure du possible. Cependant, les données statistiques disponibles présentent rarement les incertitudes, qui ne sont parfois tout simplement pas évaluées. Une nouvelle méthode d'estimation des incertitudes est proposée dans cet article.

Matériel et méthode

L'AFM suit sept étapes, adoptant et étendant les cadres génériques de (Panasiuk s. d.) et (Brunner et Rechberger 2003) : 1/ Définition du système et création de la structure ; 2/ Collecte des données ; 3/ Conversion des données en une unité d'affichage commune ; 4/ Estimation des données inconnues ; 5/ Quantification des incertitudes ; 6/ Réconciliation des données et 7/ Interprétation des résultats.

Dans ce court article, seule la partie méthodologique concernant les incertitudes est détaillée.

La méthode de quantification de l'incertitude utilisée dans cette étude, est dérivée de la méthode de Hedbrant et Sörme (2001), classant la fiabilité des fournisseurs de données sur 5 niveaux, chacun étant associé à un facteur d'incertitude (Tab. 1). Cependant, le choix des facteurs d'incertitude reste arbitraire, dépendant des choix propres au modélisateur. D'autres méthodes semi-quantitatives ont été développées avec cette même approche, la plus connue depuis son adoption dans la base de données EcoInvent, étant la matrice de pedigree (Muller et al 2016). Celle-ci classe les données sur plusieurs niveaux pour un ensemble d'indicateurs qualitatifs, qui correspondant à des facteurs conduisant à une estimation quantitative de l'incertitude.

Résultats

Le diagramme de flux réalisé présente les masses sèches de bois dans les produits pour l'année 2021 (Fig. 1). Il est organisé en suivant la hiérarchie traditionnelle des secteurs d'utilisations dans la filière : bois d'œuvre, bois industriel, puis bois énergie. Les différents secteurs ne sont pas cloisonnés ; on constate une utilisation en cascade du bois : les sous-produits des scieries sont utilisés pour produire des panneaux de particules ou pour produire de l'énergie. Cependant, ce diagramme ne montre pas les réseaux d'acteurs et ne permet donc pas de déterminer quelles sources de sous-produits de scierie alimentent quelles utilisations (par exemple, les sous-produits d'une scierie sont-ils utilisés pour produire des panneaux de particules, de la pâte à papier, des granulés, ou sont-ils brûlés directement ?).

Quatre marchés principaux de produits finis se distinguent : les papiers et cartons, la construction, les emballages et les meubles, ces trois derniers consommant la quasi-totalité de la production de bois scié et de panneaux, principaux produits semi-finis de l'industrie.

Tab. 1 : Qualification de la fiabilité des fournisseurs de données et incertitudes correspondantes (voir Boutin (2023) pour plus de détails)

Type	Incertitude	Fournisseur	Raison
1/ Statistiques nationales fournies par des organismes publics ou assimilés	5%	AGRESTE	Organisme public
		FCBA (Memento 2022)	Organisation professionnelle, réputée pour sa précision
		IGN (Inventaire Forestier National)	Organisme public
		ADEME (REP DEA)	Organisme public
2/ Statistiques nationales provenant d'organisations professionnelles	10%	ADEME (Bilan National du Recyclage)	Données extrapolées à partir des chiffres et des ratios matériels
		COPACEL	Organisation professionnelle
		Parquet Français	Organisation professionnelle
		ProPellet	Organisation professionnelle
3/ Statistiques non exhaustives, basées sur des enquêtes	15%	FCBA (GDBAT)	Enquêtes non exhaustives
		FCBA (VALOPAL)	Enquêtes non exhaustives
		Pôle Emballage Bois	Enquêtes non exhaustives
4/ Données issues d'études prospectives ou connues pour leur imprécision	30%	FCBA (Etude prospective)	Données extrapolées à partir des scénarios prospectifs de cette étude
		AGRESTE Douanes	Connu pour ses erreurs systémiques
5/ Autres données, jugées non fiables ou dont la fiabilité n'a pas pu être vérifiée, ou calculées	200%	UIPP	Données extrapolées à partir des chiffres présentés sur le site web, sans information sur leur provenance.

Cette étude montre également que d'importants flux de matériaux sont échangés avec d'autres pays. Par exemple, plus de la moitié des papiers et cartons produits en France sont exportés, tandis que 60 % des papiers et cartons utilisés en France sont importés. Si l'on se base sur l'observation des flux physiques, on constate un net déséquilibre entre les importations et les exportations. La balance commerciale de la filière qui est basée sur des flux économiques indique le même déficit. Si l'on regarde plus en détails, la France exporte de grandes quantités de produits bruts ou semi-transformés (en particulier du bois dur, qui prédomine dans les forêts françaises mais qui n'est pas adapté aux chaînes de production actuelles) et importe beaucoup de produits finis. Par exemple, 70 % des panneaux de contreplaqué utilisés en France sont importés, près d'un tiers des panneaux de bois et du bois scié de résineux qui sont principalement utilisés dans la construction, et deux tiers dans le mobilier.

Si l'on analyse les devenir des produits en fin de vie des différents secteurs, on constate que 12,4 Mt de déchets à base de bois sont collectés par an, dont les deux tiers sont recyclés et un quart sont brûlés pour produire de l'énergie. Seuls 10 % du total des déchets suivent d'autres trajectoires, parmi lesquelles la réutilisation, qui est négligeable (moins de 1 %), la mise en décharge (7 %) et les trajectoires inconnues (3 %).

Les déchets issus de l'industrie du bois semblent bien valorisés dans leur ensemble, mais cela repose essentiellement sur le secteur papiers et cartons qui représente la moitié du volume de

déchets collectés. Ce secteur récupère l'équivalent de 80 % de sa production sous forme de papiers et cartons en fin de vie qui sont destinés à être recyclés, ce qui permet de n'utiliser qu'un tiers de pâte issus de matière première vierge. Si l'on exclut ce secteur très particulier de l'analyse, seul un tiers des déchets est recyclé, et la moitié est valorisée à des fins énergétiques (Fig. 2).

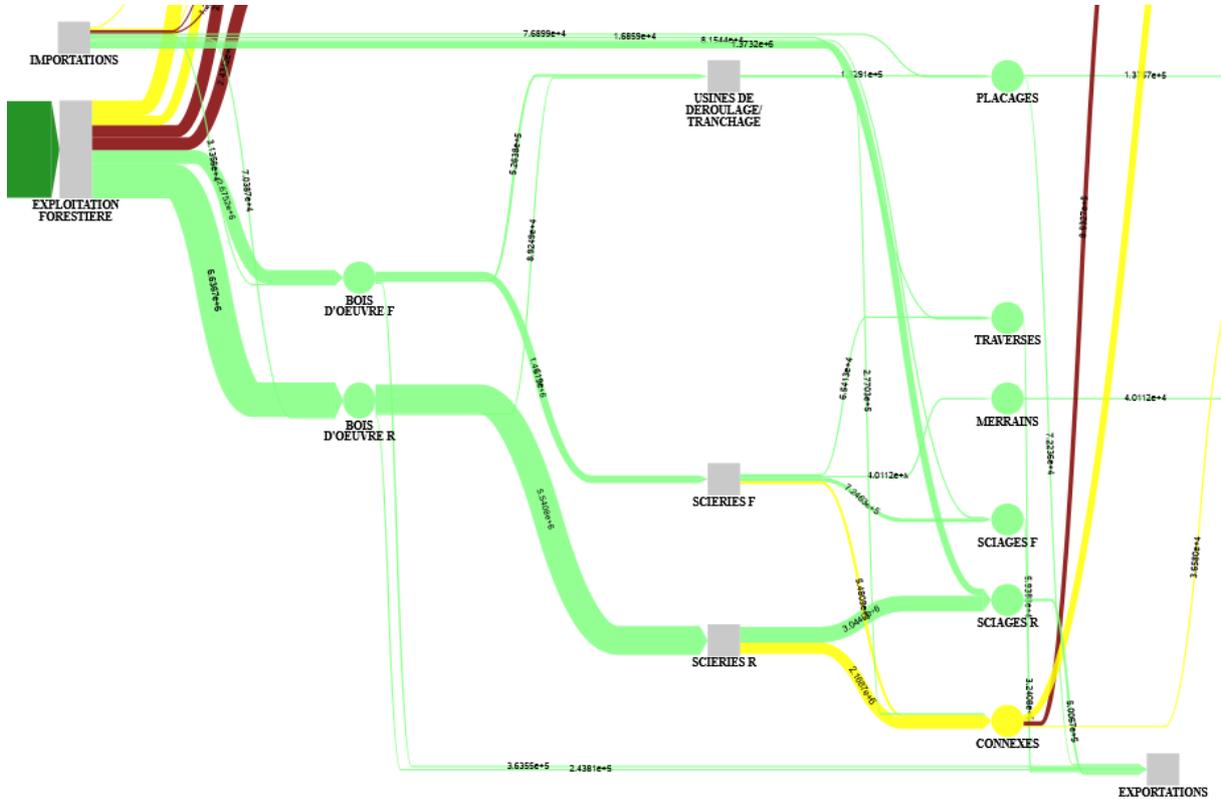


Fig. 1 : Extrait du diagramme de Sankey de la filière forêt-bois française (voir plus dans Boutin (2023))

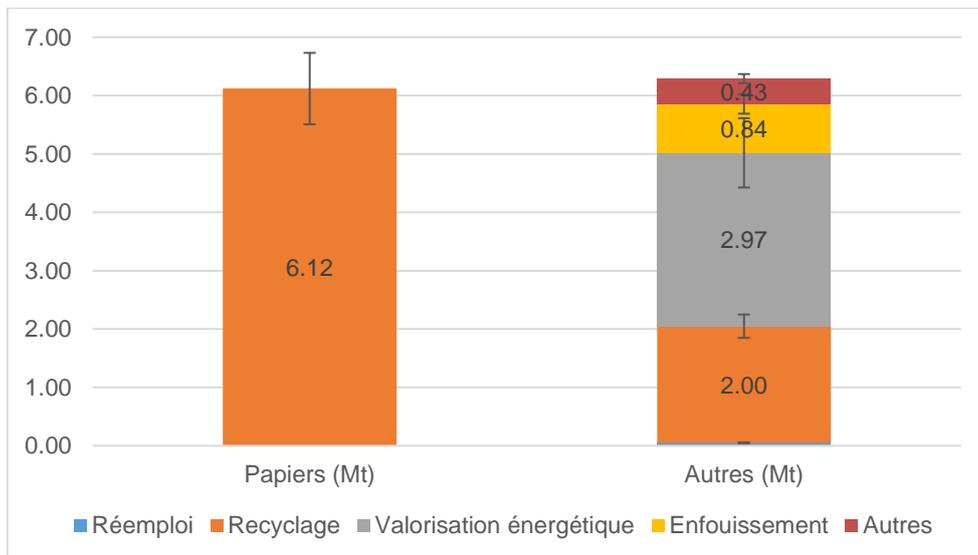


Fig. 2 : Traitement des déchets collectés en France (en 2021)

Le secteur des palettes est également circulaire, car les palettes sont utilisées plusieurs fois (parfois remises à neuf si nécessaire) avant de produire des déchets en fin de vie. En moyenne, plus de la moitié des palettes collectées sont remises à neuf.

Tous les résultats sont présentés dans Boutin (2023).

Discussion

L'AFM présentée ici est statique, elle évalue les flux de matière de la filière que pour une année donnée. L'AFM statique suppose des échanges et productions immédiats, ou induit des coupures (entre la mise sur le marché des produits finis et leur collecte en fin de vie). Or, le temps de parcours d'un matériau dans l'économie est généralement supérieur au pas de temps considéré (c'est-à-dire que l'arbre ayant servi à produire un meuble vendu à l'année N a pu être coupé à l'année N-1, et ne sera mis au rebut que 20 ans plus tard). Des données prospectives (projections dans le futur) peuvent ainsi être déduites de données historiques (observées dans le passé).

L'AFM dynamique permet le suivi des stocks de produits intermédiaires ou en usage d'année en année, en ajoutant une dimension temporelle à la matrice représentant le système. Les différentes périodes de l'étude sont reliées entre elles par ces stocks. Le stock de la période N est constitué du stock de la période N-1, augmenté des flux entrants et diminué des flux sortants.

Le processus de réconciliation est donc modifié :

- si les données relatives au solde des stocks sont connues, le processus de réconciliation se déroule de la même manière que dans un système statique, car le stock est une variable supplémentaire soumise à des incertitudes et pouvant être modifiée.
- sinon, si aucune information n'est connue sur le stock, le processus de réconciliation revient à compléter les données.

Conclusion

Les résultats de l'étude AFM présentés dans cet article complètent les travaux antérieurs réalisés sur l'industrie française du bois, en actualisant les données à 2021, et en ajoutant les étapes de fin de vie des produits jusqu'alors non explorées. Enfin il présente une première approche pour évaluer les incertitudes.

Une étude AFM est un excellent outil pour aider à comprendre le fonctionnement d'une industrie dans son ensemble et les échanges de matières entre ses acteurs. Cependant, cet outil n'évalue que les échanges de matière, sans tenir compte de l'impact associé, et serait donc plus complet s'il était associé à un outil d'évaluation environnementale, tel que l'ACV (Barkhausen et al 2023).

Remerciements

Je remercie la société EVEA d'avoir financé ce travail, ainsi que la société Terriflux et l'ONF pour m'avoir permis de l'approfondir au travers du projet BACCFIRE.

Références

AGRESTE (2025) Réduction du déficit du commerce extérieur de la filière française de bois et dérivés en 2024. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/TbdCEB2505/detail/>

Aulanier H-M, Follin-Arbelet G, Chaumet M, Dunoyer J-L (2024) Proposition d'un scénario. Annales des Mines.

Bailly A (2019) VEM-FB - Guide méthodologique du Tableau Emplois-Ressources. https://vem-fb.fr/images/2019/graphiquesVEM/graphVEM2017/Guide_methodologiqueTER_VF_2.pdf.

- Barkhausen R, Rostek L, Chunyu Miao Z, Zeller V (2023) Combinations of Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment and Their Applicability to Assess Circular Economy Requirements in EU Product Regulations. A Systematic Literature Review. *Journal of Cleaner Production* 407 (juin): 137017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137017>
- Boutin A (2023). Diagramme de Sankey de la filière forêt-bois en France métropolitaine. EVEA ; Université Gustave Eiffel. <https://hal.science/hal-04443449>
- Brandão M, Weidema Bo P, Martin M, Cowie A, Hamelin L, Zamagni A (2024) Consequential Life Cycle Assessment: What, Why and How? In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00001-2>
- Brunner P H, Rechberger H (2003) *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. 0 éd. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203507209>
- Cerceau, Juliette, Nicolas Mat, et Guillaume Junqua (2018) Territorial Embeddedness of Natural Resource Management: A Perspective through the Implementation of Industrial Ecology. *Geoforum* 89 (février): 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.01.001>
- Courtonne, J-Y, Alapetite J, Bevione M, Wawrzyniak V, Ravaud Y (2019) AF Filières - Analyse des flux des filières biomasse pour des stratégies régionales de bioéconomie - Rapport final. Report. Inria Grenoble - Rhône-Alpes. <https://hal.science/hal-03871921>
- Dubois D, Fargier H, Ababou M, Guyonnet D (2014) A Fuzzy Constraint-Based Approach to Data Reconciliation in Material Flow Analysis. *International Journal of General Systems* 43 (8): 787-809. <https://doi.org/10.1080/03081079.2014.920840>
- Hedbrant, J, Sörme L (2001) Data Vagueness and Uncertainties in Urban Heavy-Metal Data Collection. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1 (3/4): 43-53. <https://doi.org/10.1023/A:1017591718463>
- Miettinen J, Ollikainen M (2024) The Impacts of Climate and Energy Policy Instruments on Forest Bioeconomy. *Forest Policy and Economics* 169 (décembre): 103338. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103338>
- Panasiuk D. s. d. Dynamic Material Flow Analysis for Estimation of Iron Flows, Stocks and Recycling Indicators in EU-27.
- Schaubroeck T (2023) Relevance of attributional and consequential life cycle assessment for society and decision support. *Frontiers in Sustainability* 4 (juillet): 1063583. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1063583>
- Stubenrauch J, Garske b (2023) Forest Protection in the EU's Renewable Energy Directive and Nature Conservation Legislation in Light of the Climate and Biodiversity Crisis – Identifying Legal Shortcomings and Solutions. *Forest Policy and Economics* 153 (août): 102996. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102996>
- Udisi B, Gorgolewski M (2025) « A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment ». *Environmental Research Communications* 7 (2): 022003. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adb669>
- Vial, E (2024). Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français - Annexe T7.2. mai, 113-50.