

Optimisation dynamique du bénéfice économique net du secteur bois canadien sous contraintes de circularité et de carboneutralité

Kadi Rodrigue Elegbe

Doctorant en Agroéconomie, Université Laval, Québec

Mai 2026

INTRODUCTION

- ❑ Niveau international, ampleur des conséquences des changements climatiques et nécessité d'investir dans la transition énergétique (Nasr & Russell, 2018).
- ❑ Réduction des gaz à effet importante pour carboneutralité à l'horizon 2050: accords de Paris (IPCC, 2023, Tahvonen et al, 2024).
- ❑ Rôle stratégique du secteur forestier: sequestration du carbone et substitution aux émissions de carbone fossile (Bastick et al., 2024; Hetemäki et al., 2022; SCF, 2023).
- ❑ Secteur forestier canadien repose sur l'industrie de bois:
 - ❑ 48% de la main d'oeuvre forestière (RNCan, 2025; SCF, 2023).
 - ❑ Contribution au PIB d'environ 1,1 % à 1,2 % et PIB réel de 10 à 12 milliards de dollars CAD par an (RNCan, 2025; SCF, 2023).
 - ❑ Deuxième producteur mondial de bois d'oeuvre avec 16% de la production mondiale (Dufour, 2007; RNCan, 2022; SCF, 2022, 2023).

INTRODUCTION

- ❑ Malgré importance, industrie de bois confrontée à plusieurs défis
 - ❑ Modèles classiques planification forestière et transformation bois majoritairement linéaires : volumes vs flux circulaires (Moreau et al., 2017; Seuring & Gold, 2013).
 - ❑ Economie circulaire, comme enjeu majeur de transition écologique/énergétique mais faiblement connue ou valorisée (Geissdoerfer et al., 2017; Kalmykova et al., 2018; Kirchherr et al., 2023; Korhonen, Nuur, et al., 2018).
 - ❑ Multitude d'indicateurs de circularité non harmonisés : focus sur produits et approches statiques plutôt que système complet et dynamiques temporelles (De Oliveira et al., 2021; de Oliveira & Oliveira, 2023; Kirchherr et al., 2023; Khatri et al., 2025; Saidani et al., 2019).

INTRODUCTION

- ❑ Gaps méthodologiques importants
 - ❑ modèles classiques d'économie forestière optimisent la gestion des peuplements et des stocks carbone sans intégrer explicitement la circularité (IPCC, 2019).
 - ❑ faible prise en compte des dynamiques intertemporelles et des effets cohortes spécifiques au secteur bois dans les modèles de planification (Arib & Boulkhir, 2023; Aurez & Georgeault, 2019).
 - ❑ faible adoption d'une vision intégrée (rentabilité économique, circularité et impact carbone) dans les études sur l'économie forestière (Brunet-Navarro et al., 2021; Head et al., 2021; Peñaloza et al., 2018).
- ❑ Contexte marqué par engagement Canada pour la carboneutralité en 2050 et trajectoires actuelles insuffisantes (Felder & Hervas, 2023).

INTRODUCTION

Question de recherche

Comment prendre en compte l'économie circulaire et la dynamique carbone des produits bois pour atteindre la carboneutralité à l'horizon 2050 ?

METHODOLOGIE

Approche méthodologique

- ❑ Modèles d'optimisation dérivés du cadre de Faustmann (1849) et ses extensions sur dimensions carbonées et environnementales (Gutrich & Howarth, 2007; Sohngen & Mendelsohn, 2003; Sohngen et al., 1999; Tahvonen et al., 2024; van Kooten et al., 1995).
- ❑ Mais avec orientation sectorielle microéconomique (bénéfices issus production et transformation des produits bois récoltés) (Adams et al., 1996; Kim et al., 2018; Piedra-Jimenez et al., 2025).

METHODOLOGIE

Principales variables

- ❑ Production primaire ($P_{p,t}$)
- ❑ Matière primaire vierge marchande : $M_{p,t} = (1 - \rho_{p,t}^{site})P_{p,t}$ avec $\rho_{p,t}^{site}$ taux de résidus ou pertes sur site et $\rho_{p,t}^{site} \in (0,1)$.
- ❑ Disponibilité domestique de bois : $Q_{p,t} = M_{p,t} - X_{p,t} = (1 - \rho_{p,t}^{site} - \theta_{p,t}^{bal})P_{p,t}$ avec $\theta_{p,t}^{bal}$ coefficient de balance commerciale $\theta_{p,t}^{bal} \in (0,1)$.
- ❑ Allocation du bois par usage primaire ($Q_{i,p,t}$) avec $\sum_i Q_{i,p,t} = Q_{p,t}$.
- ❑ Stock de produit bois ($S_{i,p,t}$) : $S_t = f(S_{t-1}, a_{t-1})$, avec S_{t-1} stock en $t - 1$ et a_{t-1} ensemble des variables de décision.
- ❑ Flux de fin de vie ($F_{i,p,t}$): $F_{i,p,t} = \delta_i S_{i,p,t}$, avec δ_i ($\delta_i \in [0,1]$), taux de déstockage annuel.

METHODOLOGIE

Principaux indicateurs

□ Indicateur de circularité : $IDC_{p,t} = \frac{\sum_i \sum_j \beta_j F_{i,j,p,t}}{\sum_i S_{i,p,t}}$

- $\beta_j \in [0,1]$, coefficient de qualité de boucle.

□ Bilan carbone: $BC_{p,t} = EC_{p,t}^{prov} - G_{p,t} - \Delta C_{p,t}^{HWP}$

- $EC_{p,t}$ empreinte carbone (émissions de gaz à effet de serre) le long de la chaîne de production/usage du bois.
- $G_{p,t}$, captation forestière nette correspond à variation annuelle du stock de carbone dans la biomasse forestière.
- $\Delta C_{p,t}^{HWP}$, variation nette du stock de carbone dans les produits bois récoltés.

METHODOLOGIE

Fonction objectif

- Structure standard des modèles microéconomiques d'optimisation intertemporelle (Kim et al., 2018; Piedra-Jimenez et al., 2025)

$$\max_{(P_{p,t}, Q_{i,p,t}, F_{i,j,p,t})} \sum_{t=t_0}^T \frac{1}{(1+r)^{t-t_0}} \left[\sum_i \pi_{i,p,t}^{\text{prim}} Q_{i,p,t} + \sum_i \sum_j \pi_{i,j,p,t}^{\text{circ}} F_{i,j,p,t} \right]$$

- r , taux réel d'actualisation;
- $\pi_{i,p,t}^{\text{prim}}$, bénéfice net unitaire de production primaire du bois;
- $\pi_{i,j,p,t}^{\text{circ}}$, bénéfice net unitaire associé à la valorisation du produit en fin de vie.

METHODOLOGIE

Contraintes

❑ Contrainte de circularité : $IDC_{p,t} \geq IDC_{p,ref}$.

❑ Contrainte de carboneutralité : $BC_{p,T} \leq \omega_p \tau_t$

- ω_p poids de la province dans la production nationale de bois ;
- τ_t contribution nationale annuelle visée du secteur τ_t .

❑ Contrainte de disponibilité de la ressource forestière: $P_{p,t} \leq AAC_{p,t}$

- $AAC_{p,t}$, possibilités forestières soutenables.

RESULTATS

Résultats analytiques

- ❑ Modèle linéaire dynamique multipériode: conditions Karush-Kuhn-Tucker (KKT) nécessaires et suffisantes pour caractériser l'optimum global.
- ❑ Condition de stationnarité définies par rapport aux trois principales variables:
 - ❑ Matière primaire vierge ($P_{p,t}$) : augmentation production primaire économiquement justifiée seulement si valeur marginale matière dépasse valeur d'usage alternative de la ressource et coût environnemental associé aux émissions.
 - ❑ Allocation primaire par produit ($Q_{i,p,t}$) : une unité de bois allouée à un produit pas seulement évaluée sur son rendement immédiat, mais sur l'ensemble de son profil dynamique.
 - ❑ Orientation des flux en fin de vie ($F_{i,j,p,t}$) : orientation optimale des flux en fin de vie dépend du compromis entre la rentabilité circulaire, coût d'opportunité total du flux de fin de vie, bénéfice implicite de circularité et coût carbone total.

RESULTATS

Résultats empirique (Simulation avec le logiciel GAMS)

Deux scénarios: sans circularité et avec circularité

Usages de bois pris en compte:

- Bois de construction (80 ans);
- Panneaux (40 ans);
- Papier/carton (3 ans);
- Bioénergie (0).

Voies de valorisation des flux en fin de vie:

- Réutilisation (exclue du scénario sans circularité);
- Recyclage (exclue du scénario sans circularité);
- Bioénergie (exclue du scénario sans circularité);
- Incinération;
- Enfouissement.

RESULTATS

□ Dynamique de production primaire et performance économique globale

- Bénéfice actualisé plus élevé dans scénario sans circularité (5801 \$/m³) qu'avec circularité (5117 \$/m³).
- Exploitation maximale de la ressource dans scénario sans circularité (figure 1) et trajectoire décroissante en milieu de période avec circularité (figure 2).
- *Circularité ne se limite pas à gestion des déchets, mais modifie la dynamique d'exploitation de la ressource forestière.*

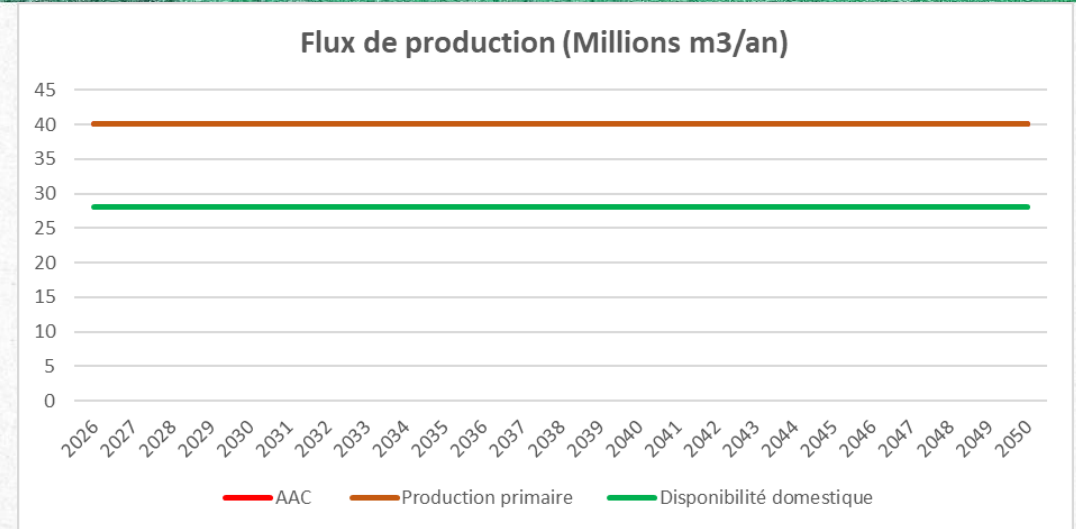


Figure 1 : Scénario sans circularité

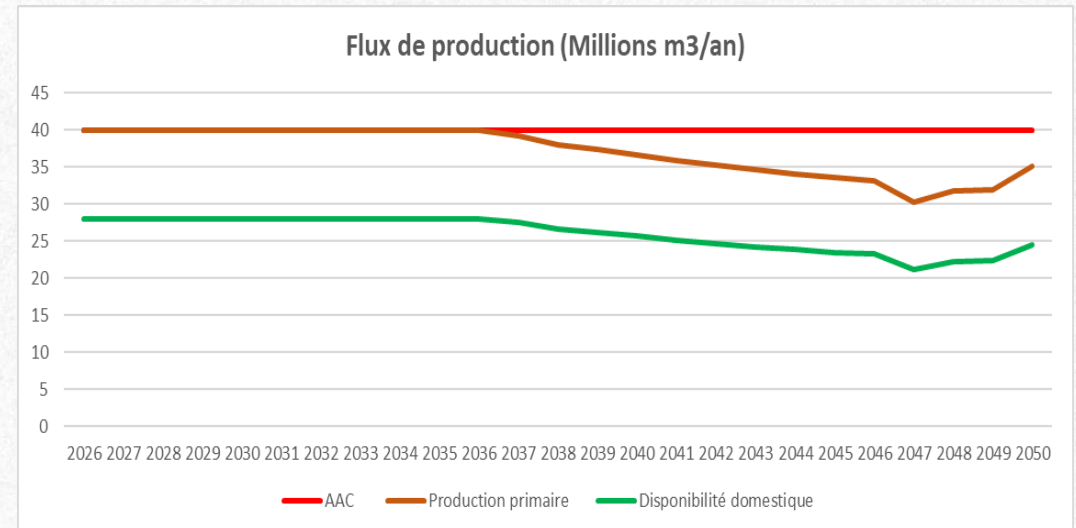


Figure 2 : Scénario avec circularité

RESULTATS

Allocation du bois entre usages

- ❑ Orientation intégrale de la ressource dans le bois de construction dans scénario sans circularité (figure 3).
- ❑ Dynamique d'allocation complexe et évolutive dans scénario avec circularité (figure 4): bois de construction et papier/carton.
- ❑ *En absence de circularité: pas de contrainte de diversification des usages et maximisation de la performance économique et carbone.*
- ❑ *Contrainte de circularité impose une réallocation de la matière vers des produits pouvant générer des flux de fin de vie à court et moyen termes (papier/carton).*

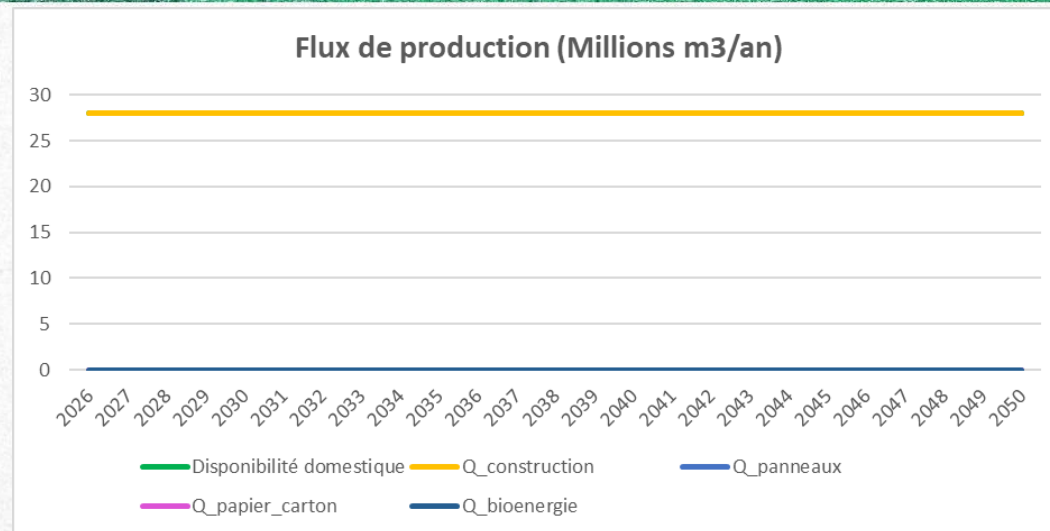


Figure 3 : Scénario sans circularité

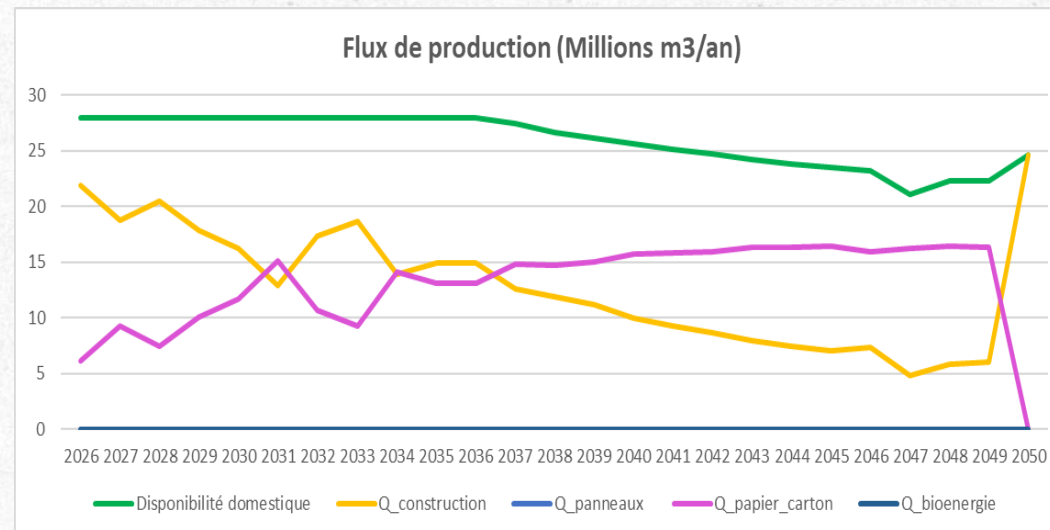


Figure 4 : Scénario avec circularité

RESULTATS

Voies de valorisation des flux de fin de vie

- ❑ Priorisation des voies émettrices de carbone en début de période (incinération pour scénario sans circularité et recyclage pour scénario avec circularité) (1ères parties figures 5 et 6)
- ❑ Orientation vers des voies moins émettrices à partir du milieu de période (enfouissement pour scénario sans circularité et réutilisation pour scénario avec circularité) (2èmes parties figures 5 et 6)
- ❑ *Logique de gestion systémique des émissions et arbitrages en fonction de la contribution globale des voies au bilan carbone.*
- ❑ *À mesure que horizon de planification se rapproche et cible carboneutralité devient plus contraignante, le modèle est incité à limiter les émissions immédiates associées aux traitements de fin de vie.*

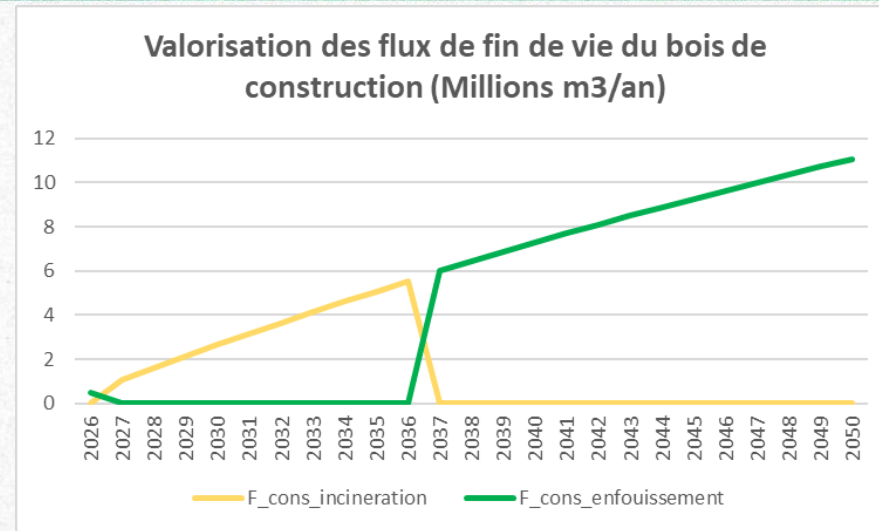


Figure 5 : Scénario sans circularité

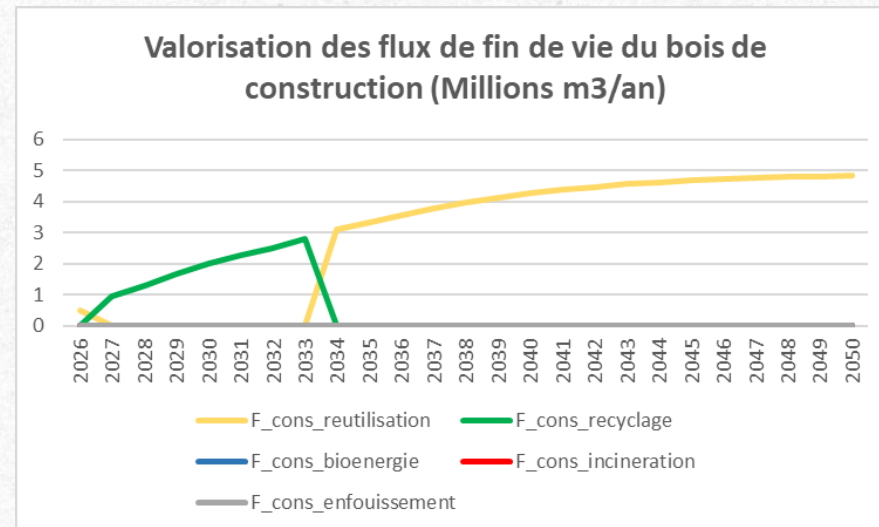


Figure 6 : Scénario avec circularité

RESULTATS

□ Dynamique du bilan carbone

- Contrairement à l'intuition initiale, le scénario sans circularité (figure 7) présente, sur une grande partie de l'horizon, un bilan carbone plus faible que le scénario avec circularité (figure 8).
- En l'absence de circularité, leviers d'ajustement limités à production primaire et aux choix d'élimination des flux: donc restriction des possibilités d'arbitrage intertemporel.
- Dans scénario avec circularité: système exploite de façon plus complète budget carbone autorisé car intensification transformations, mobilisation flux secondaires et arbitrage entre stockage et émissions dans le temps.
- *Circularité ne conduit pas nécessairement à réduction du niveau absolu des émissions: permet plutôt meilleure gestion intertemporelle du carbone et marge de manœuvre pour ajuster flux, différer certaines émissions et optimiser la combinaison production-stockage-valorisation.*

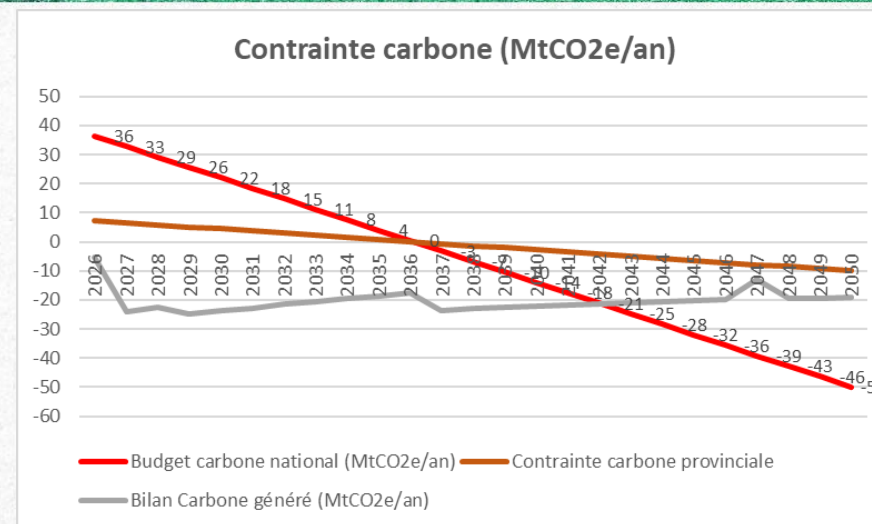


Figure 7 : Scénario sans circularité

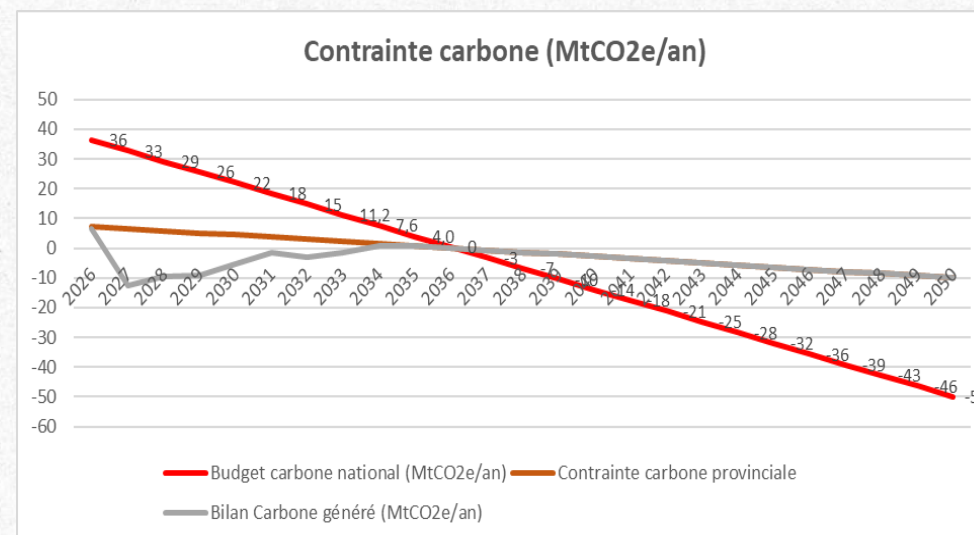


Figure 8 : Scénario avec circularité

LIMITES ET PERSPECTIVES

Limites

- ❑ Concentration des flux vers un nombre limité de filières dominantes, traduisant une solution de coin typique d'un cadre d'optimisation sans contraintes techniques sur la qualité de la ressource.
- ❑ Absence des panneaux (40 ans) dans la solution optimale pourrait être due à effet d'horizon (24 ans: 2026-2050) combiné à un arbitrage économique et carbone : modèle pourrait privilégier produits à rotation rapide (papier/carton) satisfaisant contrainte de circularité à court terme et produits à longue durée de vie (bois de construction) maximisent valeur économique et stockage carbone.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Perspectives

- Allongement de l'horizon de planification sur 100 ans (2026-2126) : dans la finalisation du document.
- Intégration de contraintes de qualité du bois et spécificités technologiques: une autre étude.

CONTRIBUTIONS

- ❑ Comble le manque de prise en compte des dynamiques temporelles et des cohortes de produits dans l'analyse des flux de matière dans les travaux de circularité.
- ❑ Répond à un enjeu peu traité de manière analytique et systémique: intégration cohérente et opérationnelle entre circularité, impact carbone et bénéfice économique.
- ❑ Fournit un outil d'aide à la décision pour orienter le secteur bois vers des trajectoires compatibles avec la carboneutralité 2050, tout en préservant la crédibilité économique de la filière.

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Logos

Couleur



Blanc



Le RRECQ est soutenu par

**Fonds
de recherche**



Le RRECQ est soutenu par

**Fonds
de recherche**

