

PROJET VALOMATBIO - ETUDE DES SCENARIOS DE FIN DE VIE DES ISOLANTS BIOSOURCES

Rapport 3 - Modélisation des scénarios de valorisation
dans l'analyse du cycle de vie des produits

RAPPORT FINAL

Déc
2022

REMERCIEMENTS

Coralie Garcia (CF2B)
Mael Steck, (SCOP BatiNature),
Aymeric Pigent, (Coopérative AcortPaille),
Nathalie Fichaux, (Interchanvre)
Antoine Elleuame, (Ecopertica)
Jules Delsalle, (Biofib)
Samuel Brookfield-Dardenne, (Technichanvre)
Jean-Pol Caroff, (ECIMA - European Cellulose Insulation Manufacturer Association),
Graziella Osuna, (ECIMA - European Cellulose Insulation Manufacturer Association)
Jean-Michel Bœuf, (ECIMA - European Cellulose Insulation Manufacturer Association)
Nicolas Canzian, (ARESO - Association Régionale d'Éco-construction du Sud-Ouest)
Stéphane Bailly, (AICB – Association des Industriels de la Construction Biosourcée)
Lubin Sacquet, (Buitex)
Blaise Dupré, (Société Isonat)
François Magueur (Soprema)
Luc Floissac (Eco-études)
Yves Andres (IMT Atlantique)
Christelle Rabbat (IMT Atlantique)
Sary Awad (IMT Atlantique)
Audrey Villot (IMT Atlantique)
Delphine ROLLET (INDDIGO)

CITATION DE CE RAPPORT

Philippe LEONARDON, ADEME. Virginie Dufour, ESTEANA, Frédéric ROSSI, ESTEANA, - 2022. **Etude des scénarios de fin de vie des isolants biosourcés**. 35 pages

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1904C0004

Étude réalisée par INDDIGO, IMT Atlantique, Eco-études, Esteara, LRA de l'ENSA de Toulouse et le CF2B pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : INDDIGO

Appel à projet de recherche : APR BAT RESP 2017

Coordination technique - ADEME : LEONARDON Philippe

Direction Ville et Territoire Durable (DVTD) / Service Bâtiment (SB)

SOMMAIRE

1. CONTEXTE DU PROJET	5
1.1. Familles de produits étudiées	6
1.2. Scénarios de fin de vie étudiés.....	6
2. METHODOLOGIE.....	7
2.1. Cadre normatif.....	7
2.2. Unité fonctionnelle et durée de vie de référence.....	7
2.3. Étapes du cycle de vie	8
2.3.1. Isolants en panneaux	10
2.3.2. Isolants en vrac	10
2.4. Déroulement des travaux	10
2.5. Indicateurs environnementaux	10
3. MODELISATIONS DES ETAPES DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE.....	11
3.1. Collecte des données pour la fabrication et la mise en œuvre	11
3.2. Résultats de la modélisation de la fabrication et de la mise en œuvre des isolants biosourcés : identification des processus les plus contributeurs aux impacts	14
4. MODELISATION DES ETAPES DE FIN DE VIE	17
4.1. Collecte des données pour les étapes de fin de vie	17
4.2. Comparaison des impacts des scénarios de fin de vie (C1-C4 et module D).....	19
4.2.1. Résultats des études d'ACV sur la fin de vie des produits	20
4.2.2. Résultats des études d'ACV sur les bénéfices et charges au-delà du système	22
5. ÉTUDE D'AUTRES INDICATEURS PERTINENTS SELON LES SCENARIOS DE FIN DE VIE .	24
5.1. Flux de matières et d'énergie – Ouate de cellulose en vrac.....	25
5.2. Flux de matières et d'énergie – Panneaux textile recyclé.....	26
5.3. Flux de matières et d'énergie – Panneaux de fibres de chanvre.....	27
5.4. Flux de matières et d'énergie – Panneaux de fibres végétales mixtes.....	28
5.5. Flux de matières et d'énergie – Panneaux flexibles de fibres de bois.....	29
5.6. Résultats sur les autres indicateurs de potentiels d'impacts	30
6. CONCLUSIONS ET LIMITES DE L'ETUDE	31
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	32
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	33
SIGLES ET ACRONYMES	34

1. Contexte du projet

Le projet ValoMatBio a pour finalité d'explorer et évaluer les différentes possibilités de valorisation des matériaux biosourcés en fin de vie du bâtiment (hors bois de construction), en étudiant différents scénarios prospectifs dans une approche de respect de la hiérarchie des modes de traitement : le réemploi, la réutilisation, le recyclage, la valorisation énergétique avant l'élimination.

Les étapes précédentes du projet ValoMatBio (voir sections précédentes) ont permis de sélectionner des produits à étudier et d'évaluer, selon des critères technico-économiques et scientifiques, la faisabilité et l'intérêt de différentes filières de fin de vie.

La présente section du rapport présente la modélisation de l'analyse de cycle de vie des isolants biosourcés étudiés dans le cadre du projet ValoMatBio, et évalue l'impact des scénarios contemporains et prospectifs de valorisation sur les impacts totaux du cycle de vie de ces matériaux. Cette étude s'est déroulée en trois temps :

- Reconstruction des modèles d'ACV des produits biosourcés étudiés.
- Création des modèles complémentaires relatifs aux scénarios de fin de vie.
- Production de versions alternatives des ACV complètes de produits biosourcés.

Les modélisations et les analyses de cycle de vie ont été réalisés en cohérence avec les principes des référentiels normatifs et réglementaires en vigueur¹ (NF EN 15804+A1, complément national, arrêtés et décrets, etc.) relatifs aux déclarations environnementales de produits de construction, qui encadrent la réalisation des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES).

Ces modèles permettent d'estimer les gains environnementaux potentiels associés à chaque scénario de valorisation, et de mettre en valeur leurs avantages et défauts selon plusieurs indicateurs environnementaux et dans le cadre de démarches d'économie circulaire.

Analyse de cycle de vie (ACV) et Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES)

L'**Analyse du Cycle de Vie (ACV)** est une méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit ou d'un service sur un large ensemble d'indicateurs environnementaux, et ce « du berceau à la tombe », c'est-à-dire à chaque étape du cycle de vie du produit : approvisionnement en matières premières, fabrication, mise en œuvre (construction, installation), transports entre chaque étapes, utilisation, déconstruction et démolition, fin de vie.

Les **Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES)** sont des déclarations environnementales établies sous la responsabilité des fabricants (ou syndicats professionnels) du produit de construction. Les normes NF EN 15804 fournissent la méthode d'obtention et le format de ces déclarations. Les impacts environnementaux indiqués dans les FDES sont issus de calculs d'Analyse de Cycle de Vie réalisés en conformité avec les normes NF EN 15804 et les autres références normatives pertinentes.

Les FDES sont notamment utilisées pour réaliser une **Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment (ACV Bâtiment)** dans le cadre de la RE2020. Les FDES sont regroupées dans la base de données INIES (<http://www.inies.fr>), accessible gratuitement et à laquelle sont connectés les logiciels permettant les calculs d'ACV Bâtiment.

L'analyse de cycle de vie (et par conséquent la réalisation de FDES) peut également être utilisée à des fins d'écoconception, d'affichage environnemental ou obtenir un label ou une certification environnementale.

Les modélisations et résultats d'ACV présentés dans cette étude ont été réalisés en cohérence avec les référentiels normatifs encadrant la réalisation de FDES, mais **ne constituent pas des FDES** en tant que telles ou des résultats exploitables pour l'affichage environnemental, la labellisation, la certification environnementale, ou le calcul d'ACV Bâtiment.

¹ En vigueur au moment de la réalisation de l'étude. A compter de novembre 2022, la norme NF EN 15804+A1 et son complément national ont été annulés et remplacés par la norme NF EN 15804+A2 et son complément national.

1.1. Familles de produits étudiées

Les étapes précédentes du projet ValoMatBio ont retenu cinq familles de produits qui ont fait l'objet d'enquêtes approfondies, de tests en laboratoire et de modélisation ACV.

Ces produits sont réalisés à partir des matériaux biosourcés suivants :

- Les fibres végétales, issues de céréales, de lin, ou de chanvre,
- La ouate de cellulose (issue de papier et carton recyclée),
- Le textile recyclé ou la laine de coton,
- La fibre ou la laine de bois vierge ou recyclée.

Le tableau ci-dessous récapitule les produits faisant l'objet des modélisations ACV² :

Famille de produit	Description succincte	Identifiant ³
Ouate de cellulose issue de papier recyclée, mise en œuvre en vrac	Isolant en vrac, fabriqué à base de ouate de cellulose issue de papiers et de cartons recyclés. Les papiers et cartons sont collectés, triés, défibrés. La ouate subit un traitement biocide et ignifugeant.	Ouate
Isolants en coton issu de textile recyclé, mis en œuvre en panneaux	Isolant en panneaux souples, fabriqués à base de fibres de coton issues de vêtements recyclés. Les vêtements usagés sont collectés auprès du grand public, triés, effilochés, puis nappés en mélange avec des fibres synthétiques, et subissent un traitement biocide et ignifugeant.	Textile
Panneaux isolants en fibre de chanvre	Isolant en panneaux souples fabriqués avec des fibres de chanvre, nappés avec des fibres synthétiques (et parfois avec des fibres de coton recyclé). L'isolant subit un traitement biocide et ignifugeant.	Chanvre
Panneaux isolants mixtes, avec mélange de fibres végétales et de coton	Isolant en panneaux souples fabriqués avec un mélange de fibres végétales vierges (souvent chanvre, coton, lin, jute, etc.), nappés avec des fibres synthétiques (et parfois avec des fibres de coton recyclé). L'isolant subit un traitement biocide et ignifugeant.	Mixte
Panneaux de fibre de bois flexibles/laine de bois	Isolants en panneaux semi-rigides, fabriqués à base de bois défibré (majoritairement vierge, peu de bois recyclé entrant), nappé avec un liant (souvent fibres polyester ou polyoléfines), subissant un traitement ignifugeant.	Bois flexible

Tableau 1 : Liste des familles de produit étudiées

Cette étude couvrant un ensemble de familles de produits, les indicateurs environnementaux présentés dans les résultats sont ceux de « produits de référence », établis pour être représentatif de chaque famille de produit sans être spécifiques à des produits commercialisés particuliers.

1.2. Scénarios de fin de vie étudiés

De nombreux scénarios de fin de vie ont été envisagés dans le projet ValoMatBio, qu'ils soient contemporains, anecdotiques ou expérimentaux. Certains scénarios de fin de vie n'ont pas été jugés pertinents à modéliser en analyse de cycle de vie dans le cas des produits objets de cette étude, pour différentes raisons technico-économiques ou scientifiques (voir sections précédentes de ce rapport). C'est par exemple le cas du compostage ou de l'utilisation directe sur les sols agricoles, qui est jugée non souhaitable en raison des adjuvants présents dans les isolants étudiés. Ces fins de vie peuvent néanmoins appropriées pour d'autres isolants comme la botte de paille ou autres céréales non transformées.

Les scénarios de fin de vie envisagés dans le cadre de cette étude sont :

- Les scénarios « contemporains » d'**enfouissement** en décharge de déchets non dangereux, et de valorisation énergétique par **incinération** avec récupération d'énergie ayant un rendement supérieur à 60% ;
- Le **réemploi** (c'est-à-dire l'utilisation « en l'état » du matériau déposé pour le même usage que l'usage du matériau neuf, sans transformation de la matière) ;

² Les modélisations ACV concernent les mêmes familles de produits que celles ayant fait l'objet des expérimentations scientifiques. Le projet ValoMatBio a également étudié les filières potentielles de fin de vie d'autres types d'isolants biosourcés qui n'ont pas fait l'objet d'expérimentations en laboratoire ou de modélisations ACV.

³ Les identifiants sont utilisés afin de faire référence plus simplement aux différentes familles de produits étudiés.

- Le **recyclage**, c'est-à-dire la production de matière secondaires après transformation des produits déposés, en **boucle fermée** lorsque le matériau est recyclé pour la fabrication d'un nouveau produit d'usage similaire, et en **boucle ouverte** lorsque le matériau secondaire rejoint une autre filière pour contribuer à la fabrication d'un produit d'usage différent ;
- Des scénarios prospectifs de **valorisation énergétique par pyrolyse ou pyrogazéification**. Ces deux procédés sont pour l'instant peu développés à l'échelle industrielle, mais sont prometteurs car, comparés à l'incinération, ils permettraient un meilleur rendement de récupération d'énergie, ils permettraient la valorisation des résidus, et ils produiraient moins d'émissions vers l'air ou permettraient plus facilement la captation des émissions.
 - La **pyrolyse** correspond à la décomposition thermique d'un déchet solide sous l'action de la chaleur, en absence d'air et à pression atmosphérique. Le déchet est transformé en résidu carboné (appelé coke ou char), en liquides (huiles, gels, et eau) et en gaz pouvant être valorisé énergétiquement. La réaction est globalement endothermique (c'est-à-dire qu'elle nécessite un apport extérieur d'énergie). Selon les conditions et les technologies de pyrolyse (par exemple pyrolyse lente ou rapide), on peut favoriser la production de char, d'huile ou de gaz. Cette technologie est d'ailleurs utilisée pour la production de biochar (un charbon d'origine organique) à partir de biomasse forestière, mais elle peut également être utilisée pour la valorisation énergétique des déchets (plastiques et autres déchets combustibles).
 - La **pyrogazéification** est un ensemble de procédés de conversion thermo-chimique des déchets, transformant à haute température, en absence d'air et en atmosphère réductrice, les déchets en un gaz (nommé syngaz) et en un résidu cendreux. Le syngaz est valorisable en biocarburant, en gaz naturel synthétique, ou en énergie. C'est un processus en deux étapes : une étape de pyrolyse suivie d'une étape de gazéification, qui peuvent être réalisées dans le même réacteur ou dans des réacteurs séparés. La pyrogazéification est, à l'échelle industrielle, globalement un procédé autotherme (c'est-à-dire que la réaction ne nécessite pas d'apport énergétique externe une fois débutée).

2. Méthodologie

Cette section présente brièvement la méthodologie utilisée pour les analyses de cycle de vie, la collecte des données, et la modélisation des scénarios de fin de vie.

2.1. Cadre normatif

Les analyses de cycle de vie ont été menées en cohérence avec les principes de la norme NF EN 15804+A1 (AFNOR, 2014) : « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction » et son complément national français NF EN 15804/CN (AFNOR, 2016).

Toutefois, le projet n'ayant pas pour objectif la publication de FDES, l'étude ne vise pas une conformité totale à ces textes (notamment car les produits modélisés ne sont pas des produits réels et que les données n'ont pas été collectées directement auprès des fabricants).

Compte tenu de la temporalité de cette étude, les modélisations ont été réalisées conformément à la norme NF 15804+A1/CN, cependant le complément national de la norme NF 15804+A2 (AFNOR, 2019; AFNOR, 2022) a été publié peu de temps après la fin de ce projet. Dans un souci de pertinence de cette étude, les flux de carbone biogénique ont par conséquent été pris en compte selon des principes similaires à ceux de la norme EN 15804+A2. Cela concerne principalement l'enfouissement, pour lequel le carbone biogénique non minéralisé a été comptabilisé sous la forme d'un flux de carbone résiduel, afin de prendre en compte les émissions de carbone biogénique sans limite de temps.

Les données secondaires utilisées pour la modélisation sont soit des FDES ou EPD réalisées suivant EN 15804, soit des données de la base Ecoinvent V3.5 « Allocation, cut-off by classification ». Dans le cas de la culture du chanvre et du lin, des données issues de la base Agribalyse 3 ont été utilisées.

2.2. Unité fonctionnelle et durée de vie de référence

Les produits ont pour fonction principale d'assurer une performance d'isolation sur des parois. La performance principale du produit est sa résistance thermique, qui dépend de sa conductivité thermique et de son épaisseur.

La Durée de Vie de Référence (DVR) des isolants biosourcés disposant de FDES est couramment de 50 ans.

Ainsi, il est proposé pour l'Unité Fonctionnelle (UF) de chaque produit type la rédaction suivante :

« Assurer une fonction d'isolation thermique sur 1 m² de paroi sur une épaisseur de X mm, pour une durée de vie de référence de 50 ans avec une conductivité thermique $\lambda = Y \text{ W/m.K}$ tout en assurant les performances prescrites du produit. »

Cette étude ne portant pas sur des références commerciales spécifiques, il est difficile de préciser les valeurs X et Y, le tableau ci-dessous présente des fourchettes de conductivité thermiques et d'épaisseurs de mise en œuvre pour les différentes familles de produits étudiés (La Maison Ecologique, 2015) :

Famille de produit	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Épaisseur (mm)
Isolants en coton issu de textile recyclé, mis en œuvre en panneaux	0,037 à 0,039	50 à 200
Ouate de cellulose issue de papier recyclée, mise en œuvre en vrac	0,038 à 0,042	Dépend de la densité et donc du type de mise en œuvre
Panneaux isolants mixtes, avec mélange de fibres végétales et de coton	0,039 à 0,041	30 à 220
Panneaux isolants en fibre de chanvre	0,040	30 à 220
Panneaux de fibre de bois flexibles/laine de bois	0,036 à 0,038	30 à 240

Tableau 2 : Conductivités thermiques et épaisseurs communes des familles de produit étudiées

2.3. Étapes du cycle de vie

Cette étude a été réalisée en suivant la réglementation en vigueur pour la réalisation de FDES, elle concerne donc les étapes du cycle de vie « du berceau à la tombe ». Un module D « bénéfiques et charges au-delà des frontières du système » a été établi.

Les frontières du système ont été fixées en respect de la norme NF EN 15804+A1, en particulier avec le respect des principes de « modularité » (les processus sont affectés au module dans lequel ils ont lieu) et du « pollueur-payeur » (les processus de traitement des déchets sont affectés aux processus qui génèrent les déchets).

Le schéma et les paragraphes ci-après présentent les processus inclus dans le cycle de vie, et les positionnent au sein des étapes fixées par la NF EN 15804+A1.

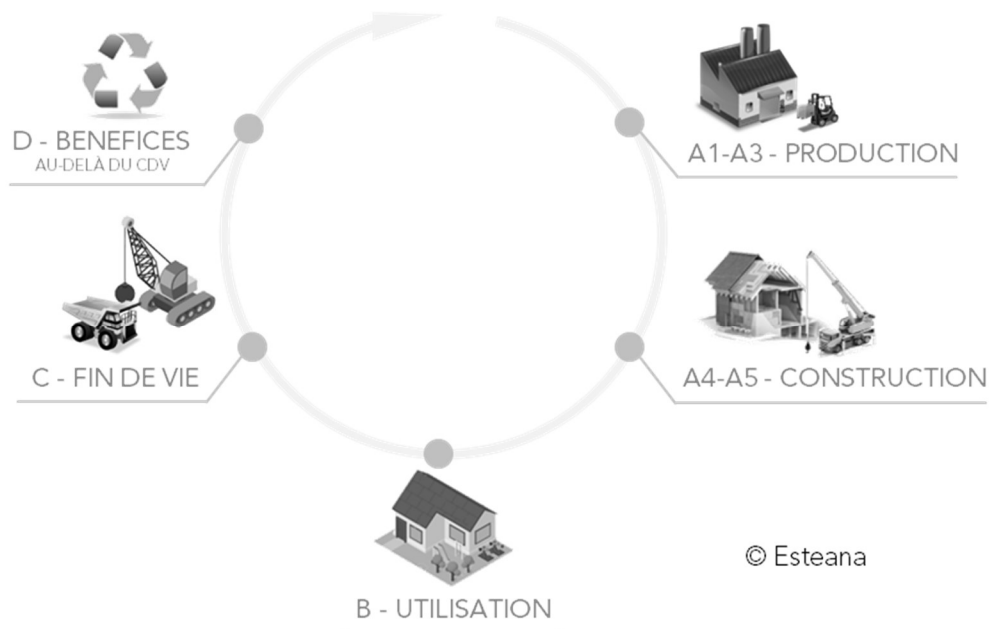


Figure 1 : Modules du cycle de vie NF EN 15804+A1

La section suivante présente des généralités sur la fabrication et la mise en œuvre des produits étudiés. Il n'est pas possible de rentrer dans les détails ou de décrire des processus spécifiques puisque les produits modélisés sont des « produits types » ne correspondant pas à un produit commercialisé en particulier.

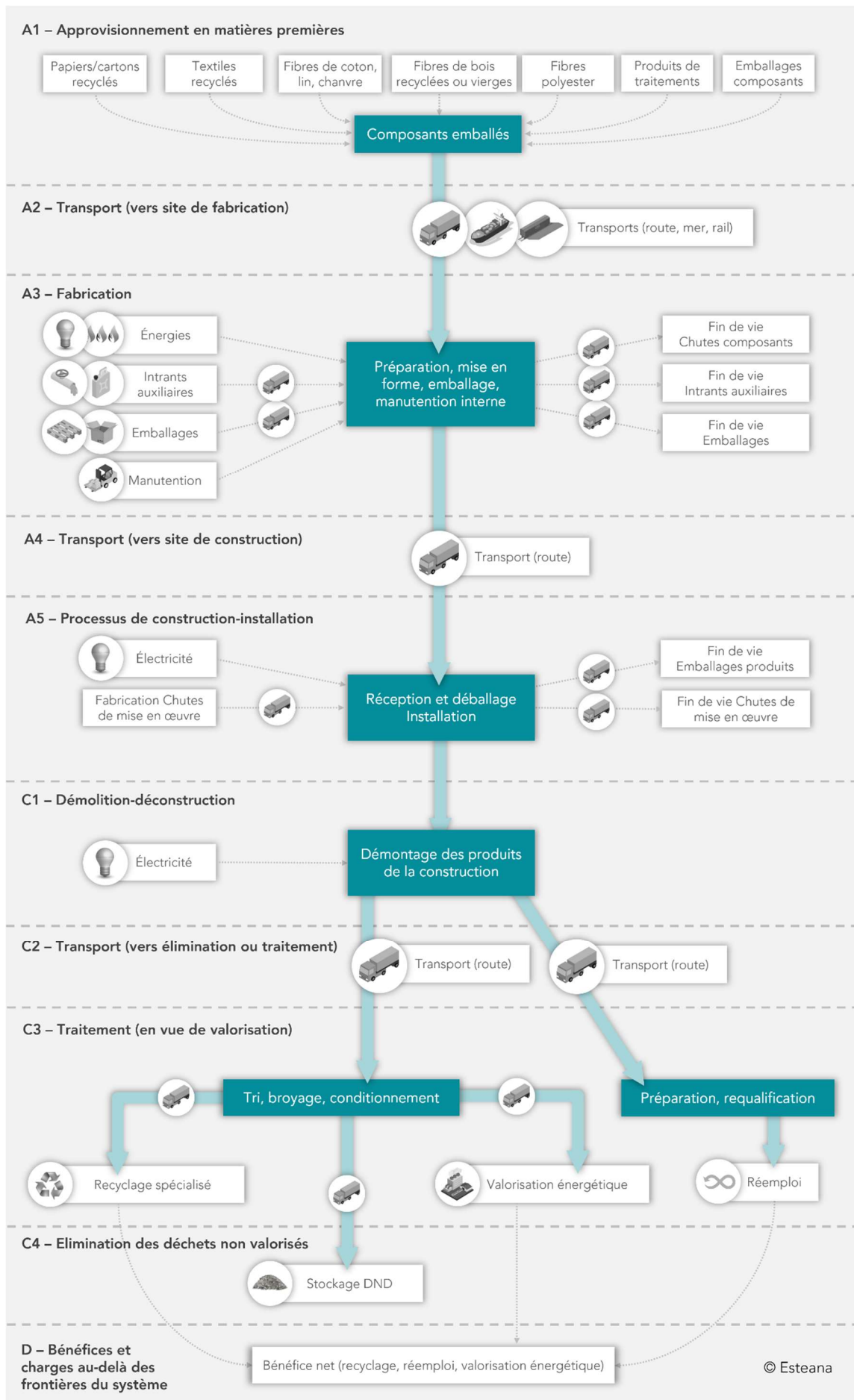


Figure 2 : Processus inclus et étapes du cycle de vie NF EN 15804+A1

2.3.1. Isolants en panneaux

Les matériaux biosourcés constituant les isolants en panneaux peuvent être des matériaux issus du recyclage (textile, papiers, cartons) ou des fibres végétales (chanvre, lin, coton, bois).

Les matériaux issus du recyclage sont triés, puis broyés et/ou effilochés. Les fibres végétales issues de l'agriculture sont broyées et/ou défibrées.

Ensuite les fibres obtenues sont nappées en mélange avec des fibres synthétiques thermoliantes, et sont traitées avec des biocides et/ou des composés ignifugeant.

Les isolants en panneaux souples sont mis en œuvre par application sur les parois à isoler, éventuellement une visseuse peut être utilisée pour la fixation.

2.3.2. Isolants en vrac

Les isolants en vrac (ouate de cellulose, dans le cadre de ce projet) peuvent être constitués de matériaux issus du recyclage (textile, ou papier/cartons dans le cas de la ouate de cellulose) ou de fibres végétales issues de l'agriculture (chanvre en vrac, etc.).

Les matériaux issus du recyclage sont triés, puis broyés et/ou effilochés. Les fibres végétales issues de l'agriculture sont broyées ou découpées et/ou défibrées.

Ensuite les fibres obtenues sont traitées avec des biocides et/ou des composés ignifugeant.

Les isolants en vrac sont mis en œuvre par soufflage ou insufflation (ouate de cellulose) ou déversage manuel (chanvre, etc.).

Les étapes exactes incluses dans le cycle de vie des différentes familles de produits étudiés peuvent varier, la figure suivante résume les étapes principales.

2.4. Déroulement des travaux

Les produits à modéliser ont été sélectionnés d'après les résultats des études technico-économiques et des expérimentations scientifiques. Les travaux d'analyse de cycle de vie ont ensuite été réalisés selon les étapes suivantes :

1. **La collecte de données** a été basée sur les données publiquement disponibles (FDES publiées, avis techniques, documentation technique des sites internet des fabricants, recherche bibliographique) concernant les différentes familles de produits.
2. **Les modélisations préliminaires** ont été réalisées grâce à ces données publiques, en se concentrant sur les étapes de production et de fin de vie des produits. Lorsque des produits disposaient de FDES publiées, les modélisations ont été affinées jusqu'à se rapprocher le plus possible des résultats déclarés dans les FDES. Cette partie est présentée dans la section 3.
3. **Les scénarios prospectifs de fin de vie** des isolants biosourcés ont été établis durant les autres étapes du projet ValoMatBio. Ils ont été modélisés à partir des données issues des entretiens réalisés auprès des filières, des résultats des expériences scientifiques, et des recherches bibliographiques. Cette partie est présentée en section 4.

2.5. Indicateurs environnementaux

L'évaluation des impacts de cycle de vie est réalisée par la multiplication entre les inventaires de cycle de vie réalisés et les facteurs de caractérisation pour les indicateurs environnementaux utilisés. Les indicateurs utilisés sont ceux requis par la NF EN 15804+A1 (pour la plus grande majorité) ou par son complément national NF EN 15804/CN (pollution de l'air et pollution de l'eau).

Dans un souci de clarté, les résultats sont présentés principalement pour les indicateurs témoins suivants :

- Réchauffement climatique total (aussi noté RC dans le présent rapport)
- Réchauffement climatique fossile (aussi noté RCF dans le présent rapport)
- Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable procédé (aussi notée ENRP dans le présent rapport)
- Déchets non dangereux éliminés (aussi notés DND dans le présent rapport)

D'autres indicateurs pertinents dans le cadre de l'étude peuvent également être étudiés (voir annexe).

Indicateur « Réchauffement climatique total » de valeur négative

L'indicateur « Réchauffement climatique total » correspond à un potentiel de réchauffement climatique exprimé en « kg équivalent CO₂ », et peut présenter une valeur positive ou négative. Lorsque la valeur est positive, cela correspond à un potentiel d'émission de gaz à effets de serre (incluant les émissions fossiles ou biogéniques). Lorsque la valeur est négative, cela correspond à une captation potentielle de gaz à effet de serre : c'est notamment le cas lors de la croissance des végétaux quand la photosynthèse permet la captation du dioxyde de carbone de l'air.

Dans les résultats d'ACV de produits biosourcés, il est fréquent d'observer des valeurs négatives sur l'indicateur « Réchauffement climatique » en début de cycle de vie (étape A1 : production des matières premières), en raison de la croissance des végétaux utilisés comme matière première. Dans le cas des matériaux recyclés d'origine biosourcés, on compte également en négatif le carbone biogénique déjà contenu dans le matériau recyclé biosourcés entrant.

En fin de vie, le carbone biogénique capté par les matériaux biosourcés est en général réémis (lors de l'incinération ou de la décomposition après enfouissement ou compostage). Dans le cas des produits destinés au réemploi ou au recyclage, le carbone biogénique est toujours contenu dans le matériau et va donc « suivre » le produit lorsqu'il sort du cycle de vie étudié. Ainsi, dans les étapes de fin de vie (C3 et C4), l'indicateur « Réchauffement climatique » reflètera cette sortie du carbone biogénique (soit en raison d'émissions de carbone biogénique, soit parce que le carbone biogénique sort du système avec le produit) : les valeurs de ces indicateurs seront donc positives.

Par conséquent, les flux de carbone biogénique s'équilibrent en entrée et en sortie du cycle de vie (-1/+1). Cependant lors de la décomposition du matériau il est possible que soit émis des gaz à effets de serre ayant un potentiel de réchauffement climatique plus important que le CO₂ (comme le méthane), par conséquent il est possible que la valeur de l'indicateur « Réchauffement climatique » en fin de vie excède la valeur correspondant à la captation du dioxyde de carbone biogénique capté en début de cycle de vie.

3. Modélisations des étapes de fabrication et de mise en œuvre

3.1. Collecte des données pour la fabrication et la mise en œuvre

La collecte de données a pour objectif de comprendre les processus en jeu, et de réaliser une modélisation des étapes de fabrication et de mise en œuvre les différentes familles de produits. Normalement la norme NF15804+A1/CN exclut l'usage de scénarios pour les étapes A1-A3, cependant ce projet n'a pas pour objectif de réaliser des FDES, et la collecte d'informations confidentielles spécifiques à des fabricants précis hors contexte de réalisation de FDES n'a pas été possible. Ainsi cette collecte a été réalisée de façon simple, principalement bibliographique (en se basant sur les données publiquement disponibles pour les produits concernés), sans souci de la valeur exacte mais avec une attention particulière sur la compréhension des phénomènes et la plausibilité des ordres de grandeur.

Les principes suivants ont guidé les choix de valeurs utilisées :

- Les valeurs doivent être réalistes et comparées aux valeurs disponibles pour des produits similaires, lorsque le doute persiste sur une fourchette de valeurs, le choix conservateur est fait ;
- Les produits-types modélisés ne correspondent pas exactement à un produit spécifique disponible sur le marché, mais ont été modélisés au plus près possible des références commerciales existantes dans un souci de cohérence ;
- Les impacts sur les étapes A1-A5 des produits-types modélisés ont été comparés aux impacts A1-A5 déclarés dans les FDES de produits similaires : lorsque les ordres de grandeurs étaient comparables, la modélisation a été jugée satisfaisante. Selon les différentes méthodes de prise en compte du carbone biogénique, les résultats sur les étapes A1-A5 peuvent parfois différer des résultats de la modélisation réalisée dans ce projet.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques et quelques informations sur la composition des produits-types faisant l'objet des analyses de cycle de vie⁴.

⁴ Les proportions des composants des produits modélisés pour l'ACV peuvent différer des valeurs obtenues lors des essais en laboratoire (étape 2 de ValoMatBio), car l'objectif n'était pas de modéliser une référence commerciale spécifique.

Paramètre	Unité	Ouate vrac	Textile panneaux flexibles	Chanvre panneaux flexibles	Mixte panneaux flexibles	Fibres de bois panneaux flexibles
Épaisseur du mur ⁵	m	0,145	0,1	0,39	0,1	0,1
Masse volumique en œuvre	kg/m ³	55	20	35	30	40
Masse pour 1m ²	kg	7,975	2	1,36	3	4
Part estimée de matériau biosourcé ⁶	%	90%	72,4%	92%	91%	89%
Fibre de chanvre				✓	✓	
Fibre de lin					✓	
Fibre de coton vierge					✓	
Fibre de bois vierge						✓
Fibre de bois recyclée						✓
Papier recyclé		✓				
Textile recyclé			✓			
Présence d'acide borique		✓				
Présence de sulfate de magnésium		✓				
Présence autre fibre ⁷			✓	✓	✓	✓
Présence autre biocide			✓			
Présence autre ignifugeant			✓		✓	✓

Tableau 3 : Caractéristiques et composition des isolants biosourcés

Pour les étapes de fabrication et de mise en œuvre, ont été pris en compte :

- Des consommations d'électricité moyenne tension pour l'ensemble des processus de fabrication (tri, transformation de la matière)
- Des consommations de carburants pour la manutention au site de fabrication
- Des consommations de gaz naturel pour la production de panneaux en fibres de bois
- Une consommation d'eau pour les processus de fabrication
- Des taux de chutes pour l'affinage du tri des matériaux recyclés (papier/carton et textile)
- Des emballages (palettes, emballages polyéthylène pour les composants liquides) pour les composants du produit.

Pour la mise en œuvre, ont été pris en compte :

- Un taux de chute pour la mise en œuvre des panneaux mixtes et des panneaux en fibre de bois
- Une consommation d'électricité basse tension pour l'alimentation des outils de mise en œuvre (souffleuse pour la ouate en vrac, visseuse pour les isolants en panneaux).

Pour la fabrication et la mise en œuvre, les valeurs utilisées proviennent d'hypothèses établies d'après les FDES de produits similaires et d'après des scénarios d'ACV couramment utilisés.

Les distances de transports pour l'approvisionnement en matière première, et du site de fabrication au site de mise en œuvre, ont été déterminés d'après des FDES de produits similaires ou sont des estimations. Tous les transports sont effectués par des semi-remorques.

⁵ Les épaisseurs de murs et les masses volumiques proviennent des FDES publiées et des documentations techniques des fabricants.

⁶ Les proportions de composants biosourcés et adjuvants ont été établies en se basant sur les FDES publiées pour des produits similaires, les documentations techniques des fabricants, et les compositions indiquées dans le Guide pratique de l'isolation écologique (La Maison Ecologique, 2015).

⁷ Les fibres parfois ajoutées dans les panneaux flexibles ou rigides sont des fibres synthétiques thermoliantes, la plupart du temps des fibres polyester ou polyoléfin. Dans la modélisation, le choix s'est porté sur les fibres polyester, qui est le type de fibres le plus répandu.

Afin d'évaluer si les modélisations des différentes familles de produits étaient pertinentes, une comparaison avec les FDES et DEP suivantes a été effectuée, sur les résultats des étapes A1 à A5⁸ :

- Ouate en vrac : Ouateco - Ouate de cellulose en vrac, mise en œuvre par insufflation, épaisseur 145 mm - Novembre 2019
- Panneaux textiles : Le Relais – Métisse RT – Juin 2015 (*date de validité dépassée*) ; RMT Insulation (Espagne) - Isolant à base de textile recyclé COTON- FRP – Août 2018
- Panneaux de chanvre : DEP Canadienne (*conforme à EN 15804*) – Nature fibres – Panneau isolant Natur-chanv/Hemp – mars 2021
- Panneaux mixtes : Cavac – Isolant Biofib Trio – Février 2018
- Panneaux de fibres de bois semi-rigides : Isonat – FLEX 40 / Isolant en fibres de bois 100 mm R = 2.6 K.m²/W (hors accessoires de pose) – Novembre 2021

La FDES de panneaux textiles fabriqués en France « Métisse RT » a dépassé sa période de validité : elle est cependant prise en compte car elle correspond au produit de ce type le plus fabriqué et vendu en France. Il existe également une FDES publiée sur la base Inies pour un produit similaire fabriqué en Espagne par un autre fabricant, les impacts des deux FDES sont cependant très différents (voir résultats plus bas). D'autres FDES sont disponibles pour la ouate en vrac et pour les panneaux de fibres de bois, cependant la comparaison s'est portée uniquement sur les FDES ayant servi de référence pour établir la plupart des paramètres de modélisation, afin de s'assurer de la cohérence de la modélisation.

Pour toutes les familles de produits, des différences existent entre les résultats des FDES publiées et les modélisations de ce projet. Elles sont aisément explicables par l'utilisation de données non spécifiques et d'hypothèses, au lieu de données précises collectées auprès du fabricant, ainsi que par des différences dans la composition des produits. La comparaison ne peut donc s'effectuer que sur des ordres de grandeur, et uniquement pour juger de la crédibilité des modélisations de ce projet.

- Pour la ouate en vrac, les ordres de grandeurs des impacts sur les indicateurs témoins sont similaires à ceux de la FDES publiée, le réalisme de la modélisation est donc jugé satisfaisant.
- Pour les panneaux textiles, les écarts sont importants pour les étapes A1-A3. Cependant, les écarts d'impacts déclarés entre les deux FDES sont très importants également : cela peut être dû à des processus inconnus dans l'étape A3 (processus de recyclage du textile, etc.), à des paramètres de transport différents, ou bien à une manière différente de prendre en compte le carbone biogénique. En l'absence d'information spécifiques, il n'est pas possible d'affiner la modélisation pour approcher des résultats des FDES, il a donc été jugé plus pertinent de conserver la modélisation des étapes A1-A3 telle qu'elle est afin qu'elle reste similaire à celle des autres familles de produits (notamment à celle de la ouate, également réalisée à partir de matériaux recyclés). Pour les autres indicateurs et les autres étapes, les résultats calculés sont d'ordre de grandeurs soit similaires, soit pénalisants, comparés à ceux des FDES publiées.
- Dans le cas des panneaux mixtes, pour l'indicateur Réchauffement climatique sur les étapes A1-A3, l'écart entre les résultats s'explique sûrement par des données de production des fibres biosourcées et synthétiques moins conservatrices dans la FDES que dans la modélisation ValoMatBio. Différentes proportions de fibres entre le chanvre, le lin et le coton vierge ont été testées (les proportions réelles dans le produit objet de la FDES ne sont pas connues), sans pouvoir atteindre le résultat déclaré dans la FDES sur l'indicateur Réchauffement climatique total pour l'étape de production A1 : la seule hypothèse pouvant expliquer cet écart est l'utilisation de données différentes pour modéliser les processus de production des matières premières (données d'agriculture, données de production des fibres polyester, données de production des traitements ignifugeants). Cependant, cet écart sur l'indicateur Réchauffement climatique (total) est peu important pour les analyses de cette étude qui portent sur la fin de vie des matériaux, car il a été vérifié que les quantités de matériaux biosourcés entrantes et la captation du carbone biogénique étaient bien cohérentes.
- Pour les panneaux en chanvre, l'impact « Réchauffement climatique total » des étapes A1-A3 des résultats calculés sont très proches de ceux de la DEP. La modélisation réalisée dans ce projet est donc estimée pertinente.
- Pour les panneaux de fibre de bois, les ordres de grandeurs des résultats calculés sont similaires et la plupart du temps pénalisants par rapport à la FDES publiée, la modélisation est donc jugée satisfaisante.

⁸ Les résultats détaillés de ces comparaisons ne sont pas présentés ici dans un souci de clarté. L'ensemble des comparaisons est présent dans le rapport de modélisation (confidentiel) qui a été soumis à une revue critique.

3.2. Résultats de la modélisation de la fabrication et de la mise en œuvre des isolants biosourcés : identification des processus les plus contributeurs aux impacts

Afin d'identifier les processus qui contribuent le plus aux impacts environnementaux des étapes de fabrication et de mise en œuvre des isolants biosourcés, une analyse de gravité a été effectuée sur les étapes A1 à A5 du cycle de vie.

L'identification des paramètres influents des étapes de fabrication et mise en œuvre permet d'éclairer l'analyse des résultats sur l'ensemble du cycle de vie. Les figures ci-après présentent pour chaque famille de produits les résultats synthétiques des séries de calculs réalisés.

Les pourcentages indiqués correspondent à la valeur absolue de la contribution par rapport aux impacts sur l'ensemble du cycle de vie (A1-C4) avec un scénario de fin de vie par défaut de 50% enfouissement de déchets non dangereux et 50% incinération avec récupération d'énergie rendement >60% (scénario proche de ceux utilisés dans les FDES publiées de produits similaires). Les résultats sont présentés pour l'indicateur Réchauffement climatique fossile, pour éviter que les flux de carbones biogéniques ne perturbent la lecture.

Pour l'ensemble des tableaux suivants, dans un souci de lisibilité, certaines contributions nulles ou très faibles (moins de 1%) ont été masquées.

Étapes et processus du cycle de vie – Ouate	RC fossile	ENRP	DND
	(en kg CO2 eq.)	(en MJ PCI)	(en kg)
Étape A1 - Approvisionnement en matières premières	24,86%	34,25%	3,07%
<i>Production acide borique</i>	8,67%	13,67%	1,36%
<i>Production sulfate de magnésium</i>	6,17%	8,69%	0,82%
<i>Mise à dispo emballage palettes</i>	2,30%	2,98%	0,60%
<i>Mise à disposition emballage bigs bags</i>	1,43%	1,34%	0,04%
<i>Mise à disposition Emballages composants adjuvants</i>	6,29%	7,57%	0,24%
Étape A2 - Transports d'approvisionnement en matières premières	12,09%	11,70%	4,27%
<i>Transport approvisionnement papiers à recycler</i>	5,35%	5,17%	1,89%
<i>Transport approvisionnement acide borique</i>	1,78%	1,72%	0,63%
<i>Transport approvisionnement sulfate de magnésium</i>	4,16%	4,02%	1,47%
Étape A3 - Fabrication	16,92%	13,90%	1,88%
<i>Électricité site de fabrication</i>	0,25%	2,75%	0,07%
<i>Fin de vie des emballages adjuvants</i>	4,15%	0,07%	0,37%
<i>Mise à dispo emballage palettes</i>	2,30%	2,98%	0,60%
<i>Mise à dispo emballages sacs et films PE</i>	10,21%	10,79%	0,70%
Étape A4 - Transport vers chantier	19,76%	19,10%	6,86%
Étape A5 - Processus de construction-installation	6,84%	0,73%	0,63%

Tableau 4 : Analyse de gravité des étapes A1-A5 pour la ouate en vrac

Étapes et processus du cycle de vie – Textile	RC fossile	ENRP	DND
	(en kg CO2 eq.)	(en MJ PCI)	(en kg)
Étape A1 - Approvisionnement en matières premières	62,54%	48,72%	28,97%
<i>Production biocide</i>	3,96%	3,54%	1,95%
<i>Production ignifugeant</i>	12,14%	12,44%	5,35%
<i>Production fibres polyester</i>	44,11%	30,79%	21,13%
<i>Mise à disposition Emballages composants adjuvants</i>	1,61%	1,35%	0,18%
Étape A2 - Transports d'approvisionnement en matières premières	4,14%	2,77%	3,12%
<i>Transport approvisionnement textiles à recycler</i>	1,74%	1,17%	1,77%
Étape A3 - Fabrication	21,20%	36,77%	13,60%
<i>Électricité site de fabrication</i>	3,08%	23,19%	2,59%
<i>Fin de vie palettes</i>	5,62%	4,85%	4,58%
<i>Mise à dispo emballages sacs et films PE</i>	5,01%	3,69%	0,99%
Étape A4 - Transport vers chantier	4,00%	2,69%	4,01%
Étape A5 - Processus de construction-installation	4,18%	6,26%	1,68%
<i>Fin de vie palettes</i>	5,62%	4,85%	4,58%
<i>Fin vie Emballages Sacs et Films PE</i>	3,33%	0,04%	0,87%

Tableau 5 : Analyse de gravité des étapes A1-A5 pour les panneaux en textile recyclé

Étapes et processus du cycle de vie – Chanvre	RC fossile	ENRP	DND
	(en kg CO2 eq.)	(en MJ PCI)	(en kg)
Étape A1 - Approvisionnement en matières premières	42,80%	25,36%	21,93%
<i>Production du chanvre</i>	9,39%	2,96%	9,47%
<i>Production fibres polyester</i>	32,26%	21,51%	12,02%
Étape A2 - Transports d'approvisionnement en matières premières	16,99%	10,93%	12,84%
<i>Transport approvisionnement chanvre</i>	15,16%	9,77%	12,01%
Étape A3 - Fabrication	19,19%	53,76%	6,60%
<i>Électricité site de fabrication</i>	6,21%	44,66%	4,06%
<i>Mise à dispo emballages sacs et films PE</i>	10,94%	7,69%	1,68%
Étape A4 - Transport vers chantier	5,48%	3,53%	4,27%
Étape A5 - Processus de construction-installation	10,13%	2,77%	2,49%
<i>Mise à dispo chutes lors de la mise en œuvre</i>	1,69%	1,87%	0,91%
<i>Fin vie Emballages Sacs et Films PE</i>	7,26%	0,08%	1,47%

Tableau 6 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux en fibres de chanvre

Étapes et processus du cycle de vie – Mixte	RC fossile	ENRP	DND
	(en kg CO2 eq.)	(en MJ PCI)	(en kg)
Étape A1 - Approvisionnement en matières premières	54,13%	41,83%	27,96%
<i>Production du chanvre</i>	5,18%	2,11%	6,35%
<i>Production de la paille de lin</i>	1,46%	1,10%	0,32%
<i>Production du coton vierge</i>	22,54%	16,61%	10,03%
<i>Production ignifugeant</i>	0,99%	1,25%	0,41%
<i>Production fibres polyester</i>	23,04%	19,82%	10,45%
Étape A2 - Transports d'approvisionnement en matières premières	12,02%	9,97%	11,05%
<i>Transport approvisionnement chanvre</i>	8,36%	6,95%	8,06%
<i>Transport approvisionnement lin</i>	1,18%	0,98%	1,14%
<i>Transport approvisionnement coton neuf</i>	1,18%	0,98%	1,14%
Étape A3 - Fabrication	18,00%	34,15%	9,31%
<i>Électricité site de fabrication</i>	2,01%	18,66%	1,60%
<i>Fin de vie palettes</i>	4,07%	4,33%	3,14%
<i>Mise à dispo emballages sacs et films PE</i>	7,44%	6,75%	1,39%
Étape A4 - Transport vers chantier	3,92%	3,25%	3,72%
Étape A5 - Processus de construction-installation	8,08%	7,43%	2,83%
<i>Mise à dispo chutes lors de la mise en œuvre</i>	1,76%	1,78%	1,04%
<i>Fin de vie palettes</i>	4,07%	4,33%	3,14%
<i>Fin vie Emballages Sacs et Films PE</i>	4,94%	0,07%	1,22%

Tableau 7 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux en fibres végétales mixtes

Étapes et processus du cycle de vie – Fibres de bois	RC fossile	ENRP	DND
	(en kg CO2 eq.)	(en MJ PCI)	(en kg)
Étape A1 - Approvisionnement en matières premières	49,68%	42,84%	22,26%
<i>Production des fibres de bois neuves</i>	10,64%	11,33%	4,93%
<i>Production ignifugeant</i>	1,26%	1,46%	0,52%
<i>Production fibres polyester</i>	36,58%	28,96%	16,32%
Étape A2 - Transports d'approvisionnement en matières premières	8,68%	6,62%	7,39%
<i>Transport approvisionnement fibres de bois neuves</i>	6,28%	4,80%	5,96%
Étape A3 - Fabrication	25,23%	37,14%	7,30%
<i>Électricité site de fabrication</i>	1,91%	16,35%	1,50%
<i>Gaz naturel site de fabrication</i>	11,40%	10,37%	0,18%
<i>Fin de vie palettes</i>	3,01%	2,95%	2,28%
<i>Mise à dispo emballages sacs et films PE</i>	5,03%	4,20%	0,92%
Étape A4 - Transport vers chantier	4,98%	3,80%	4,64%
Étape A5 - Processus de construction-installation	6,54%	5,68%	2,07%
<i>Mise à dispo chutes lors de la mise en œuvre</i>	1,77%	1,81%	0,83%
<i>Fin de vie palettes</i>	3,01%	2,95%	2,28%
<i>Fin vie Emballages Sacs et Films PE</i>	3,34%	0,05%	0,81%

Tableau 8 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux semi-rigides en fibre de bois

Interprétation :

- Pour toutes les familles de produit, l'approvisionnement en matières premières (A1) est la contribution la plus importante aux impacts totaux parmi les étapes A1-A5.
- Parmi les contributions de l'étape A1, la plus importante est celle des fibres polyester (quand elles sont présentes). La modélisation de la production des fibres polyester dans ce rapport est basée sur des hypothèses pénalisantes (quantité d'énergies, type d'énergies, mix énergétique), en l'absence de données spécifiques. Les masses et les processus de production des fibres synthétiques ajoutées aux isolants biosourcés sont donc des paramètres potentiellement impactants, auxquels il est important de prêter attention pour l'écoconception des produits ou lors de la collecte de données pour la réalisation de FDES.
- Parmi les autres contributions importantes de l'étape A1, on retrouve la production des adjuvants (acide borique, sulfate de magnésium, biocide de composition exacte inconnue, ignifugeant de composition exacte inconnue). Dans une perspective de réalisation de FDES d'isolants biosourcés, il serait donc important de préciser les compositions et les modes de production des adjuvants utilisés.
- Les productions agricoles (chanvre, lin, coton) et sylvicoles (fibres de bois) sont également des contributions importantes. Pour plus de précision lors de la réalisation de FDES, il serait intéressant d'utiliser des inventaires plus précis des cultures concernées, plutôt que des données secondaires issues des bases de données.
- Parmi les autres contributions importantes des étapes A1-A5, on retrouve les transports (approvisionnements et transports vers chantier) et les énergies consommées pour la fabrication (en particulier pour les panneaux de fibres de bois). Il s'agit de paramètres pour lesquels il est aisé de collecter des données spécifiques lors de la réalisation de FDES, tandis que les valeurs des paramètres utilisées dans ce projet sont des hypothèses.

4. Modélisation des étapes de fin de vie

4.1. Collecte des données pour les étapes de fin de vie

Pour la modélisation des fins de vie des isolants biosourcés et des bénéfiques et charges au-delà des frontières du système, une nouvelle série de données a été collectée. Un soin particulier a été porté aux choix des valeurs de paramètres pour les scénarios de valorisation des produits en fin de vie.

Les hypothèses de valeurs des paramètres et les scénarios collectés et utilisés pour réaliser la modélisation des étapes C1-C4 et du module D sont basés principalement sur :

- Les rapports, documentations, etc. relatifs à la fin de vie des isolants biosourcés
- Les FDES existantes pour des produits proches
- Les publications scientifiques (articles et thèses) sur les fins de vie de matériaux biosourcés et sur les processus de valorisation énergétique et matière
- Le résultat des enquêtes « Dépose » et « Filières », ainsi que la synthèse « Etude technico-économique de la gestion des isolants en fin de vie », issues des autres sous-parties du projet ValoMatBio
- Les résultats des essais en laboratoire (Phase 2) : résultats de pyrolyse et pyrogazéification (PCI et compositions des différentes phases, rendements, etc.).

Les principes suivants ont guidé le choix des valeurs à utiliser :

- Les valeurs ont été choisies pour leur réalisme dans la situation contemporaine si possible
- Les valeurs issues de résultats des essais en laboratoire ont été privilégiées chaque fois que c'était possible (récentes, fiables, et spécifiques aux produits étudiés)
- Lorsque le scénario est prospectif, les valeurs issues de bibliographie sont choisies de façon à être réalistes, le choix conservateur étant fait si le doute persiste sur une fourchette de valeurs
- Le choix des valeurs issues de recherche bibliographiques a été vérifié à dire d'experts.

Les différents scénarios de fin de vie étudiés ont été choisis en se basant sur l'ensemble des résultats des études réalisées dans le cadre de ValoMatBio : résultats scientifiques, résultats des entretiens avec les filières, bilan des études sur la dépose sélective, etc. et validés par les participants au projet. Il s'agit des scénarios de fin de vie prospectifs les plus intéressants ou souhaitables selon les aspects technico-économiques et physico-chimiques, sélectionnés en fonction du principe de hiérarchie du traitement des déchets. Voici la synthèse des scénarios recommandés, pour chaque type de produits :

Fin de vie	Recommandations Étude technico-économique	Recommandations Résultats scientifiques
Ouate vrac	Valorisation énergétique : majoritaire Recyclage en boucle ouverte ou fermée : envisageable Réemploi : anecdotique	Pyrogazéification recommandée : valorisation du syngaz, et récupération du bore dans les cendres. L'huile de pyrolyse est trop visqueuse pour être valorisable.
Textile Panneaux flexibles	Valorisation énergétique : majoritaire Recyclage en boucle ouverte ou fermée : envisageable Réemploi : anecdotique	Pyrolyse recommandée : pour la valorisation du biochar aux propriétés intéressantes. Biohuile produite en quantités trop faibles cependant. Pyrogazéification totale techniquement problématique, pyrogazéification partielle envisageable pour valorisation du biochar.
Chanvre Panneaux flexibles	Valorisation énergétique : majoritaire Réemploi : anecdotique	Pyrolyse intéressante : biohuile, char et gaz valorisables. Comportement intéressant en pyrogazéification également.
Mixte Panneaux flexibles	Valorisation énergétique : majoritaire Réemploi : anecdotique	Comportements similaires pour panneaux de chanvre, panneaux mixtes, et panneaux fibres de bois (regroupement possible dans une même filière).
Fibre de bois Panneaux flexibles	Valorisation énergétique : majoritaire Recyclage en boucle fermée : envisageable (panneaux flexibles/semi-rigides uniquement)	

Tableau 9 : Synthèse des recommandations pour la fin de vie de chaque type de produits

Note : les études technico-économiques ont envisagé toutes les fins de vie possibles, et lorsque la valorisation énergétique est recommandée, elles ne spécifient pas s'il s'agit d'incinération avec récupération d'énergie, de combustibles solides de récupération, de pyrolyse ou de pyrogazéification. Les essais en laboratoire n'ont concerné que les potentiels de pyrolyse et de pyrogazéification, ainsi que les potentiels de valorisation des différentes phases résultants de ces processus.

Seule la ouate en vrac requière une consommation d'électricité pour la dépose du matériau en fin de vie (aspiration), la même valeur a été utilisée que pour la mise en œuvre avec souffleuse.

Pour les transports des matériaux en fin de vie vers les centres de tri de déchets du bâtiment, vers élimination ou vers valorisation, des distances ont été estimées d'après des FDES de produits similaires. Tous les transports sont réalisés en poids-lourds.

Les caractéristiques physico-chimiques des isolants biosourcés (taux d'humidité, contenu carbone, PCI) proviennent des résultats expérimentaux en laboratoire. Il en est de même pour les rendements et les PCI des différentes phases produites par la pyrolyse et la pyrogazéification (biohuile, biochar, gaz, etc.). Les valeurs utilisées sont listées dans les annexes de la partie Phase 2 de ce rapport.

Quelle que soit la voie, **le CO₂ capté par les composants biosourcés des produits en A1 est entièrement réémis**, en C3 pour les parts valorisées, et en C4 pour la part éliminée en suivant les principes énoncés dans la norme NF 15804+A2.

Les scénarios choisis pour la modélisation du module D correspondent aux scénarios jugés les plus pertinents (d'un point de vue faisabilité, intérêt, etc.) et sont des scénarios modélisables en ACV sur la base de données bibliographiques. De nombreuses possibilités existent pour le destin des matériaux recyclés en boucle ouverte, et pour la valorisation des produits de pyrolyse et de pyrogazéification : toutes les possibilités ne peuvent pas être modélisées dans le cadre de cette étude. Ainsi, les scénarios suivants ont été sélectionnés, pour les procédés de traitement et les produits substitués :

- Le recyclage en boucle ouverte alimente la filière de la fabrication des garnitures de portières automobiles (scénario identifié comme pertinent dans l'étude technico-économique, et rapport ADEME disponible sur l'ACV de la production de garnitures de portières biosourcées ou pétrosourcées (ADEME, 2016)) ;
- Le gaz de pyrolyse est valorisé énergétiquement (scénario le plus commun) ;
- La biohuile de pyrolyse est raffinée en biocarburants (scénario envisagé par les essais en laboratoire) ;
- Le biochar de pyrolyse est utilisée comme charbon actif pour l'adsorption de composés (scénario envisagé par les essais en laboratoire) ;
- Le syngaz de pyrogazéification est raffiné en biocarburants, hydrogène et énergie grâce au procédé Fischer-Tropsch (scénario envisagé par les essais en laboratoire).

D'autres possibilités existent pour la valorisation des produits au-delà du système, par conséquent deux des limites de cette étude sont la non-exhaustivité des possibilités de valorisation, et la nécessité de choisir une technologie de traitement et de valorisation parmi les nombreux procédés disponibles.

4.2. Comparaison des impacts des scénarios de fin de vie (C1-C4 et module D)

L'objectif principal de ce rapport est d'évaluer comment les scénarios de fin de vie des isolants biosourcés influencent les résultats d'ACV sur l'ensemble du cycle de vie. Pour cela, les impacts sur les étapes de fin de vie (C1-C4 et module D) sont comparés pour chaque famille de produit et pour chaque scénario de fin de vie.

Les recommandations pour la fin de vie des différentes familles de produits sont résumées dans le Tableau 9. Le tableau ci-dessous résume les scénarios qui ont été modélisés dans l'analyse de cycle de vie, pour chaque famille de produits. En plus des scénarios de fin de vie listés dans le tableau ci-dessous, un scénario de référence nommé « FDES » en raison de sa proximité avec les scénarios souvent rencontrés dans les FDES contemporaines d'isolants biosourcés, a été également pris en compte. Ce scénario correspond à une pondération de 50% enfouissement et 50% incinération avec récupération d'énergie.

Produit/Fin de vie	Ouate vrac	Textile Panneaux flexibles	Chanvre Panneaux flexibles	Mixte Panneaux flexibles	Fibre de bois Panneaux flexibles
Enfouissement	Oui				
Incinération avec récupération d'énergie	Oui				
Recyclage boucle fermée	Oui (semi-fermée, en panneaux de ouate)	Oui	Oui	Oui	Oui
Recyclage boucle ouverte	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Réemploi	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Pyrolyse	Non	Oui (valorisation biochar uniquement)	Oui	Oui	Oui
Pyrogazéification	Oui	Non	Oui	Oui	Oui

Tableau 10 : Scénarios de fin de vie pris en compte en ACV pour chaque type de produits

Comme la pyrolyse et la pyrogazéification sont des technologies qui ne sont pas encore largement déployées à l'heure actuelle, il est difficile de les modéliser de façon réaliste. Par conséquent, plusieurs scénarios de consommation d'énergies ont été étudiés : les résultats sont présentés pour un scénario « de base » (construit pour être assez réaliste et globalement conservateur), et plusieurs scénarios alternatifs pour chaque technologie, faisant varier les quantités et les types d'énergies requises. Par souci de simplicité de lecture des résultats, les histogrammes présentent les résultats pour les scénarios « de base » avec une barre d'erreur correspond à l'écart maximal des scénarios alternatifs.

4.2.1. Résultats des études d'ACV sur la fin de vie des produits

Les figures suivantes présentent les résultats sur les étapes C1-C4 pour chaque scénario de fin de vie évalué et pour chaque famille de produits.

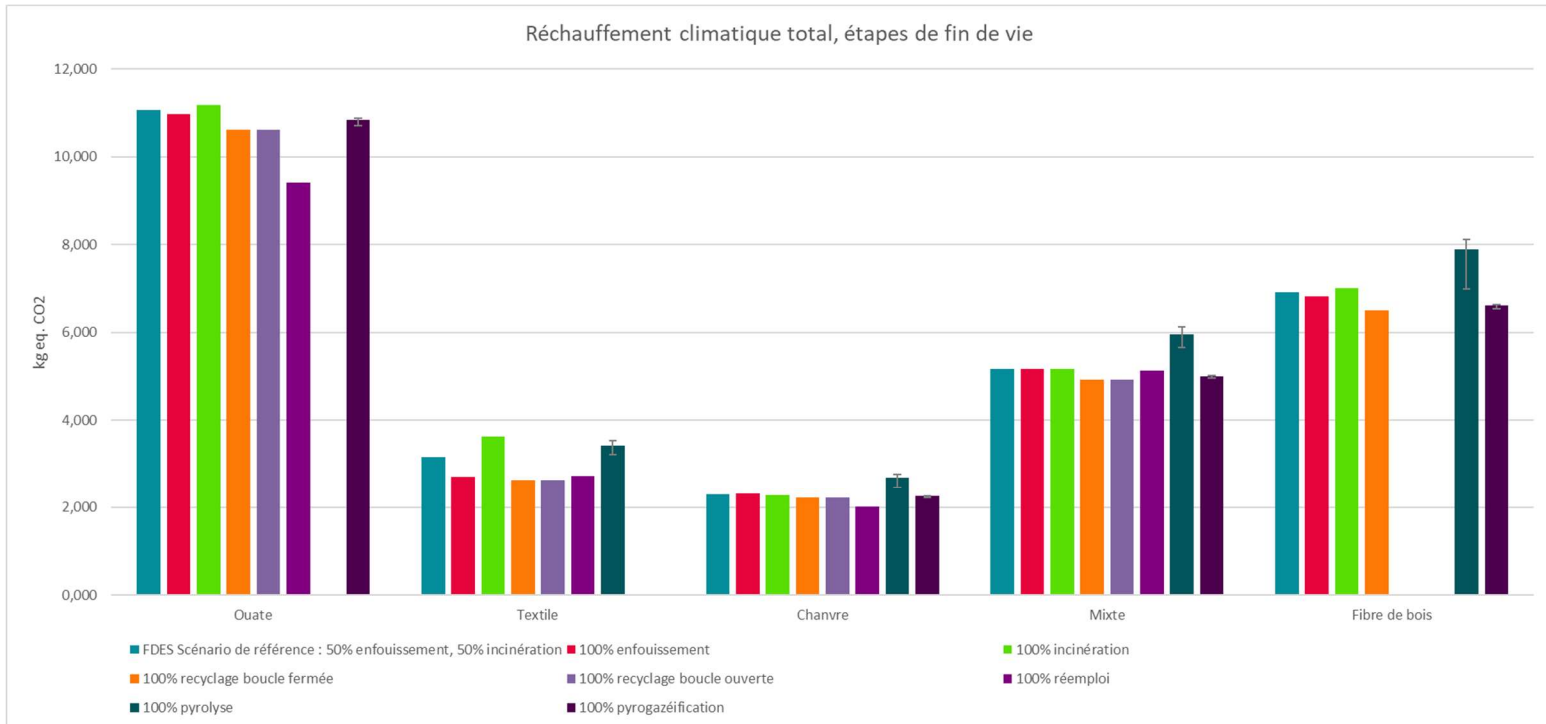


Figure 3 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Réchauffement climatique total pour les étapes C1-C4

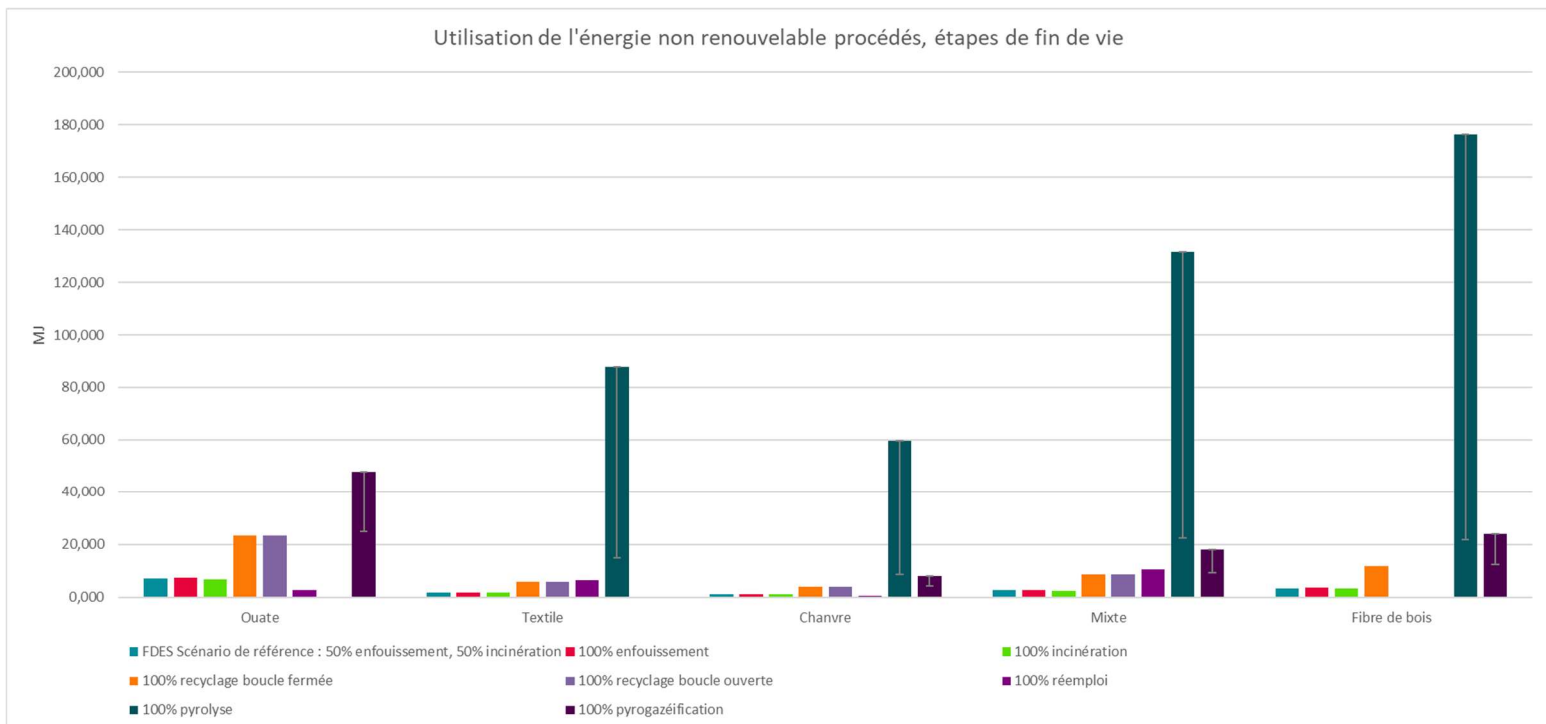


Figure 4 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Energies non renouvelables procédés pour les étapes C1-C4

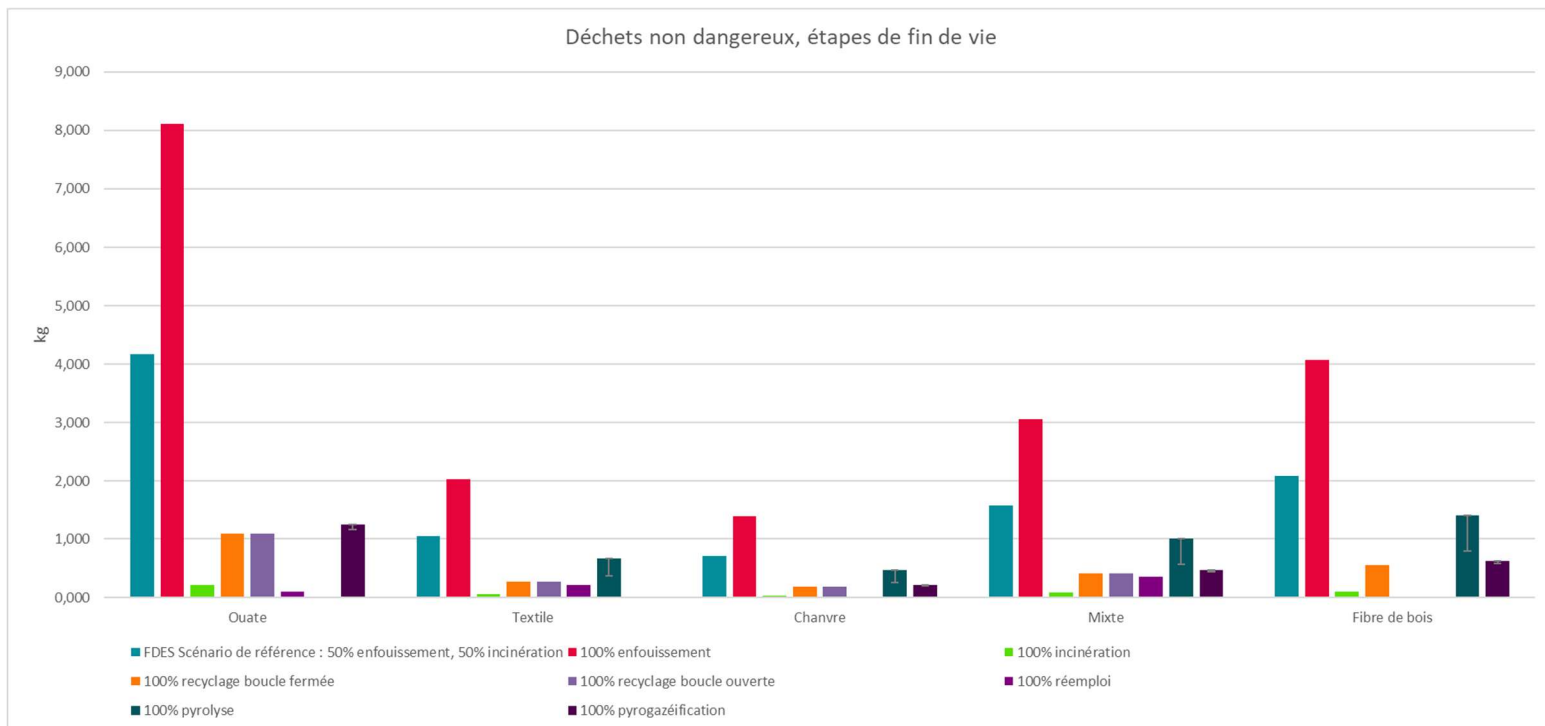


Figure 5 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Déchets non dangereux pour les étapes C1-C4

Interprétation des résultats sur les étapes C1-C4 :

- Pour toutes les familles de produits concernées, l'un des scénarios de fin de vie le plus favorable sur les étapes C1-C4 est le réemploi, car une fois le produit déposé, il suffit de le conditionner et de le transporter sans requalification requise. Cependant, le réemploi a été identifié dans l'étude technico-économique comme un scénario anecdotique en raison des contraintes de qualité du matériau et des contraintes de performances qui en découlent.
- Pour toutes les familles de produits, l'incinération est l'un des plus impactants des scénarios pour les étapes C1-C4, en raison des impacts comptabilisés dans les processus Ecoinvent utilisés et de la réémission du carbone biogénique. Cependant, l'incinération produit de la chaleur donc la récupération est comptabilisée dans le module D.
- Pour toutes les familles de produits concernées, le recyclage en boucle ouverte ou fermée présente des impacts modérés sur les étapes C1-C4 pour les indicateurs Réchauffement climatique et Utilisation de l'énergie non renouvelable procédés, parfois supérieurs au réemploi puisque les matériaux subissent une transformation (tri et broyage) et un transport long. En effet, cette transformation et ce transport implique des émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile et une consommation d'énergie non renouvelable. Les impacts du recyclage peuvent être limités en favorisant un recyclage de proximité (moins de transport, ici arbitrairement fixé à une échelle nationale) et en limitant la consommation d'énergie pour le processus de recyclage (tri/broyage/manutention). Cependant, le recyclage permet une réduction importante des déchets non dangereux éliminés.
- Pour toutes les familles de produits concernées, la pyrolyse et la pyrogazéification ont des impacts relativement élevés sur les étapes C1-C4, surtout sur l'indicateur témoin Utilisation de l'énergie non renouvelable procédés. La raison principale de ces impacts élevés est l'importante consommation d'énergie pour fournir la chaleur requise pour ces réactions de thermoconversion. Les modélisations des processus de pyrolyse et de pyrogazéification de cette étude étant basée sur des recherches bibliographiques et sur des hypothèses conservatrices, elles ne sont pas nécessairement représentatives de la réalité d'une application industrielle pour le traitement des déchets et ne sont pas spécifiques à une technologie donnée. Les barres d'erreur des graphiques, qui correspondent à l'écart maximal aux résultats des scénarios alternatifs considérés, donnent une idée de la grande sensibilité des paramètres de consommation d'énergies de pyrolyse et de pyrogazéification. De plus, comme détaillé dans le rapport « Valorisation énergétiques des déchets par voie thermo-chimique » (RECORD, 2017), ces technologies sont encore en phase de maturation et nécessitent encore des adaptations et améliorations afin de contrer leurs problèmes actuels. Un des axes d'amélioration des impacts environnementaux est de s'assurer que les consommations énergétiques d'origine externe pour les processus de pyrolyse et de pyrogazéification soient limitées (utilisation des gaz produits par le process, etc.), et que les rendements énergétiques soient optimisés. Il est également important de bien capter les gaz émis afin d'éviter les émissions vers l'air.

4.2.2. Résultats des études d'ACV sur les bénéfices et charges au-delà du système

Le module D correspond au potentiel de valorisation au-delà du cycle de vie du produit, qu'il s'agisse d'une valorisation matière ou d'une valorisation énergétique. Plus sa valeur est négative, plus le potentiel de valorisation est grand. A l'inverse, une valeur positive indique qu'il y a plus de charges que de bénéfices à valoriser le produit au-delà de son cycle de vie.



Figure 6 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Réchauffement climatique total pour le module D

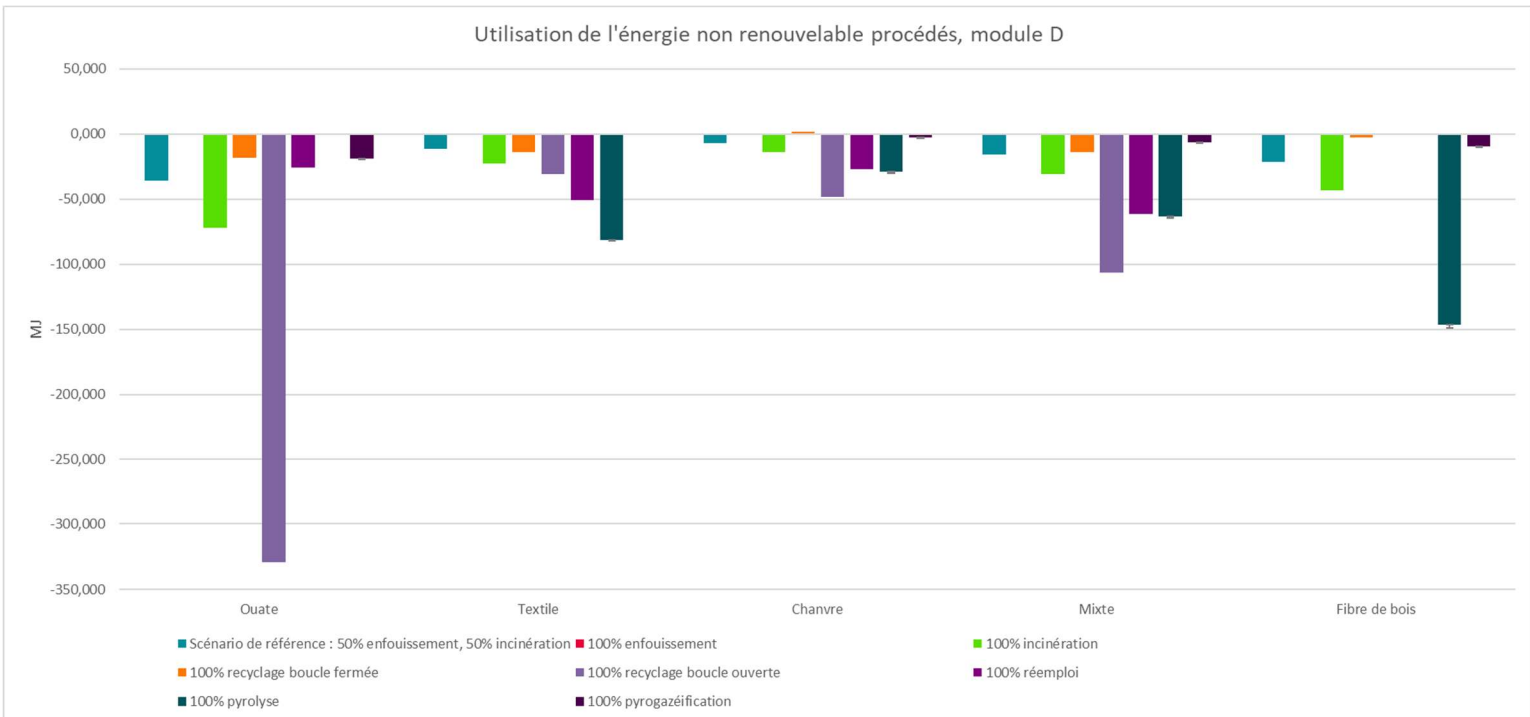


Figure 7 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Energie non renouvelable procédés pour le module D

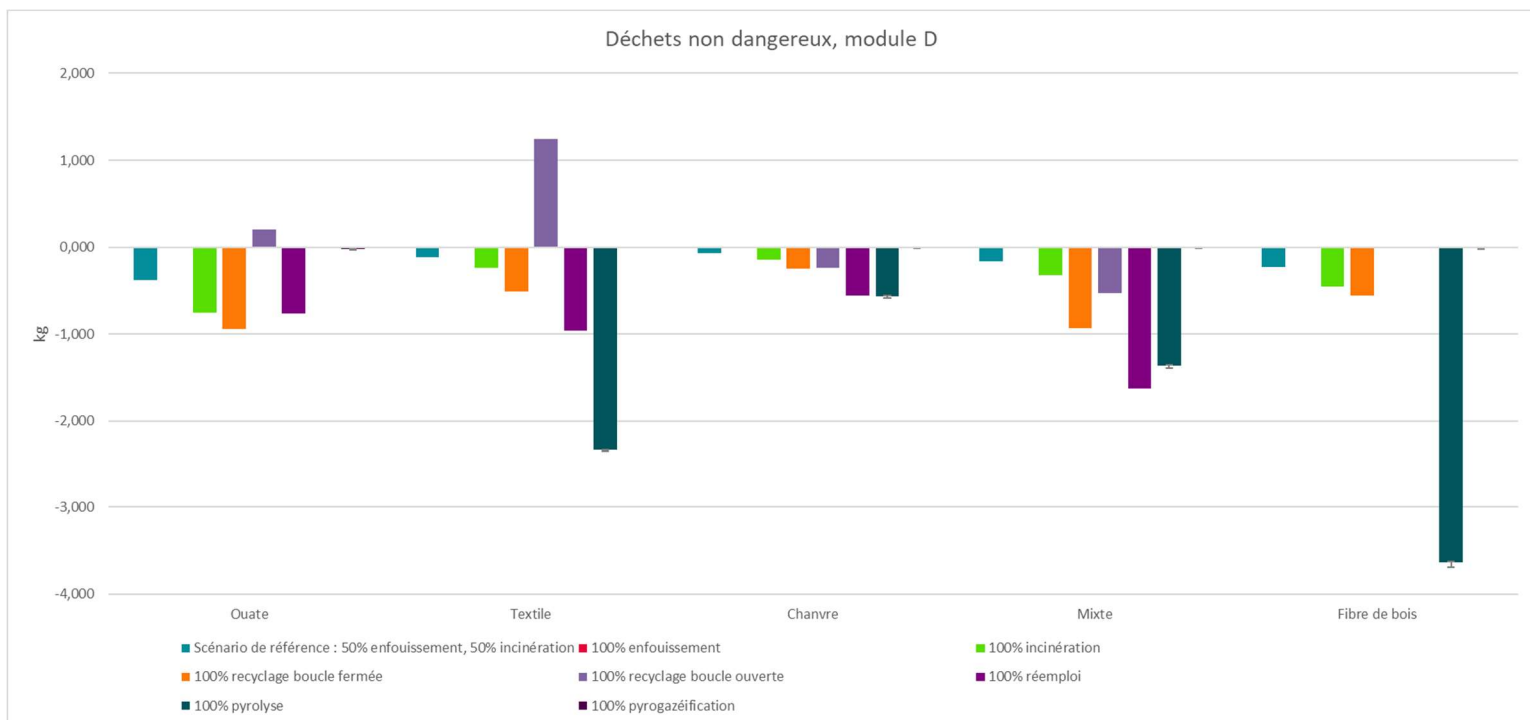


Figure 8 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Déchets non dangereux pour le module D

Interprétation des résultats sur le module D :

- Pour toutes les familles de produits, parmi les scénarios de fin de vie « standards », l'incinération a l'avantage de présenter une valorisation en énergie non négligeable. Cependant, dans le scénario utilisé, les bénéfices correspondent à la chaleur produite par l'incinération qui se substitue à l'utilisation de chaudières charbon, gaz et fioul, des énergies fossiles à émissions importantes de CO₂. Ces chaudières à énergies fossiles ne correspondent qu'à 40% de la production totale de chaleur (rapport Bilan énergétique de la France (Ministère de la transition écologique, 2021)), le reste de la chaleur produite est issue de la combustion de biomasse et de déchets. Il est important de considérer les bénéfices de la valorisation énergétique dans ce contexte.
- Le recyclage en boucle fermée permet pour tous les produits une valorisation au-delà du cycle de vie, d'impacts modérés sur les indicateurs Réchauffement climatique et Energies non renouvelables procédés. En effet, étant donné que les matériaux biosourcés sont déjà peu impactants sur ces indicateurs lors de leur fabrication, le bénéfice à les recycler en boucle fermée en fin de vie est non négligeable mais limité. Cependant, il permet d'éviter l'élimination de déchets (voir l'indicateur Déchets Non Dangereux éliminés), ce qui constitue un avantage environnemental en soi.
- En ce qui concerne le recyclage en boucle ouverte (ici, pour les panneaux de garniture de portières automobiles), le bénéfice du recyclage des isolants biosourcés en fin de vie est beaucoup plus important, car les matières secondaires se substituent à des matériaux neufs potentiellement non renouvelables et pétrosourcés (ici, on considère que les matières secondaires se substituent à 50% à des matières plastiques type ABS). Cependant, dans le cas du textile, le recyclage en boucle fermée présente plus de charge que de bénéfices, ce qui est explicable par le fait que les panneaux isolants textiles sont déjà constitués à près de 80% de matières recyclées (les bénéfices de l'usage de matières recyclées entrantes étant soustraites au calcul des impacts du module D). La même tendance pourrait être observée pour l'isolant en ouate de cellulose (90% de recyclé entrant), mais l'avantage à utiliser de la ouate issue de papiers et cartons recyclés au lieu de fibres vierges n'est pas aussi important que l'avantage d'utiliser des textiles de seconde main au lieu de fibres de cotons vierges. Dans tous les cas, le recyclage permet une réduction importante des déchets non dangereux éliminés (enfouis ou incinérés sans récupération d'énergie).
- La modélisation du réemploi dans le module D ne comprend que les impacts évités de la fabrication du même isolant, tous les autres impacts étant déjà comptabilisés dans le module C. Ainsi, comme les isolants biosourcés présentent relativement peu d'impacts à leur fabrication sur l'indicateur Réchauffement climatique, le réemploi, pour les produits concernés, est toujours un bénéfice au-delà du cycle de vie mais d'importance modérée, puisqu'il ne se substitue pas à des produits très impactants. Dans tous les cas, le réemploi présente des bénéfices importants sur l'indicateur Déchets non dangereux puisqu'il évite la production de déchets.
- La pyrogazéification présente, pour tous les produits concernés, des bénéfices mineurs au-delà du cycle de vie, via la valorisation du syngaz en biocarburants. Les bénéfices sont limités car le processus de valorisation, la réaction de Fischer-Tropsch, a un rendement plutôt faible. De plus, les bénéfices liés à la production évitée (de diesel, essence, hydrogène

et électricité) ne sont pas très élevés car la production de ces extraits présente des impacts environnementaux modérés.

Approfondissement sur le module D pour la pyrolyse :

Pyrolyse : détails module D		Bénéfice net valorisation énergétique gaz de pyrolyse	Bénéfice net valorisation biohuile de pyrolyse	Bénéfice net valorisation biochar de pyrolyse
Textile	RC total (en kg CO2 eq.)	-0,087	N/A	-3,863
	RC fossile (en kg CO2 eq.)	-0,087	N/A	-3,873
	ENRP (en MJ PCI)	-1,421	N/A	-79,798
	DND (en kg)	-0,020	N/A	-2,319
Chanvre	RC total (en kg CO2 eq.)	-0,087	0,667	-2,019
	RC fossile (en kg CO2 eq.)	-0,087	0,669	-2,025
	ENRP (en MJ PCI)	-1,411	14,222	-41,715
	DND (en kg)	-0,019	0,661	-1,212
Mixte	RC total (en kg CO2 eq.)	-0,139	1,157	-4,147
	RC fossile (en kg CO2 eq.)	-0,139	1,161	-4,157
	ENRP (en MJ PCI)	-2,261	24,667	-85,654
	DND (en kg)	-0,031	1,146	-2,489
Fibres de bois	RC total (en kg CO2 eq.)	-0,222	1,487	-8,458
	RC fossile (en kg CO2 eq.)	-0,223	1,493	-8,480
	ENRP (en MJ PCI)	-3,625	31,711	-174,707
	DND (en kg)	-0,050	1,473	-5,076

Tableau 11 : Détails des résultats d'ACV sur le module D pour les différentes valorisations après pyrolyse

- La pyrolyse est, pour toutes les familles de produit concernées, une des fins de vie les plus bénéfiques au-delà du cycle de vie : en effet, les gaz de pyrolyse sont valorisés énergétiquement, la biohuile peut être valorisée en biocarburants (sauf pour les panneaux en textile recyclé), et le biochar est également valorisé. De manière globale la valorisation énergétique du biogaz procure des bénéfices mineurs, et la valorisation du biochar a d'important avantages étant donné que le produit auquel se substitue le biochar est le charbon actif d'origine fossile dans cette modélisation. Quant à la valorisation de la biohuile en biocarburant, elle est plus une charge qu'un bénéfice en raison des catalyseurs à base de métaux précieux nécessaires pour les réactions chimiques impliquées, et en raison des rendements faibles des processus de raffinage. Par conséquent, sur la somme des impacts du module D, la pyrolyse paraît être la fin de vie la plus avantageuse pour le textile, mais il s'agit du matériau pour lequel la valorisation de la biohuile n'est pas possible, le total n'est donc pas pénalisé par cette charge. De plus, il est important de prendre en compte que la modélisation de cette étude substitue le biochar à du charbon d'origine fossile, or d'autres méthodes de production de charbon moins impactantes existent également (bois, noix de coco, etc.) : pour affiner la modélisation des bénéfices de la valorisation du biochar de pyrolyse, il faudrait une étude plus approfondie des différentes filières de production de charbon actif.

5. Étude d'autres indicateurs pertinents selon les scénarios de fin de vie

Afin de compléter les analyses, en plus des indicateurs témoins, d'autres indicateurs ont été étudiés, qui permettent de rendre compte de la contribution à l'économie circulaire des scénarios de fin de vie des isolants biosourcés, et de l'intérêt des différentes valorisations énergétiques en matière d'énergie fournie sous forme d'électricité, de vapeur et de gaz de process.

Les indicateurs étudiés sont :

- Utilisation de matière secondaire
- Déchets non dangereux éliminés
- Composants destinés à la réutilisation
- Matériaux destinés au recyclage

- Energie fournie à l'extérieur (électricité)
- Energie fournie à l'extérieur (vapeur)
- Energie fournie à l'extérieur (gaz de process)

Dans les résultats présentés ci-dessous, les impacts sont évalués sur l'ensemble du cycle de vie des produits (étapes A1-C4).

5.1. Flux de matières et d'énergie – Ouate de cellulose en vrac

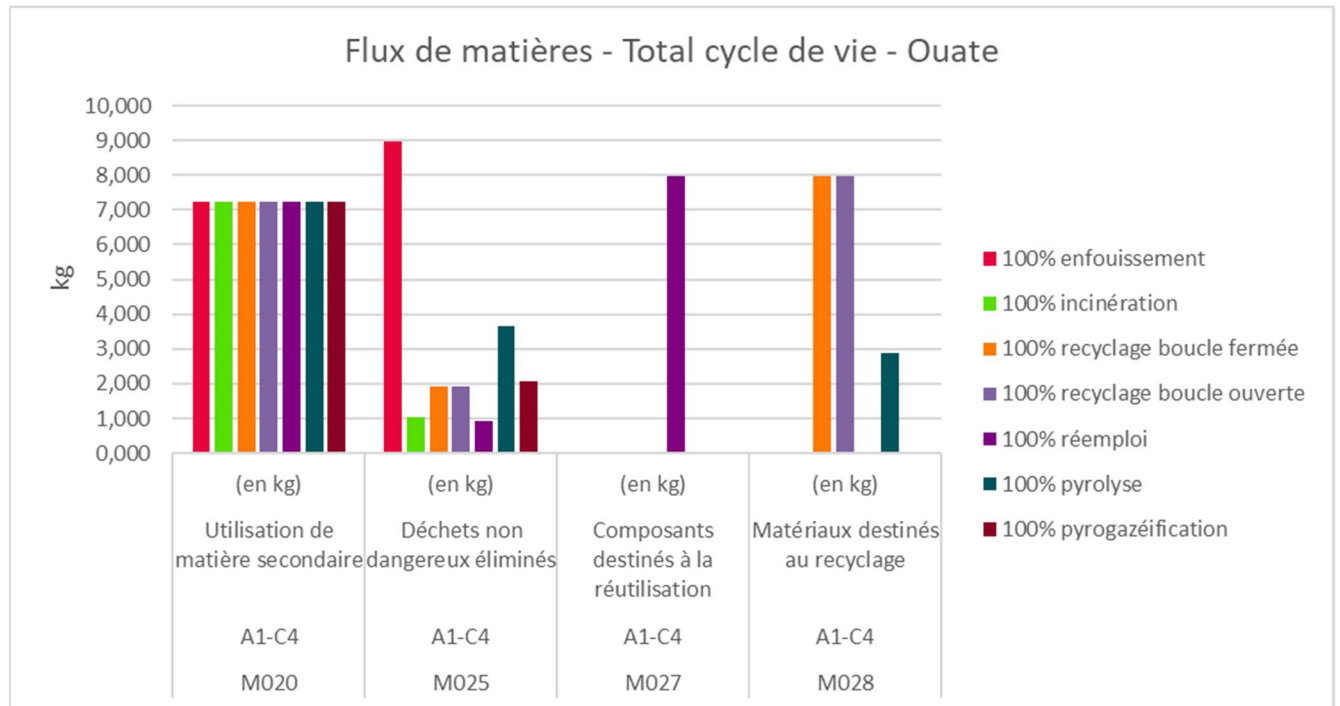


Figure 9 : Flux de matières secondaires et de déchets de la ouate

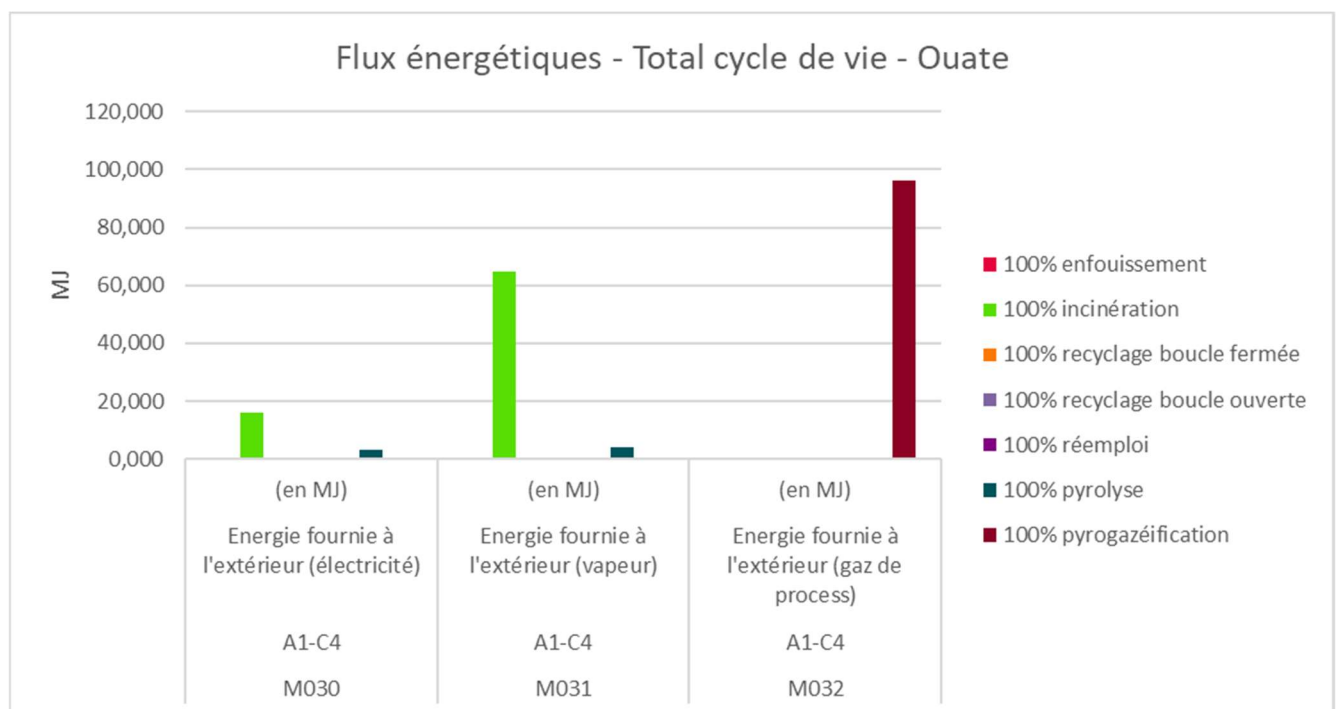


Figure 10 : Energie fournie à l'extérieure (ouate)

La ouate de cellulose en vrac étant composée en grande partie de matière secondaire (papiers et cartons recyclés), le réemploi et le recyclage permettent une excellente circularité du matériau (les masses de matériaux réutilisés et recyclés sont supérieures à la masse de matière secondaire entrante en raison des autres composants de l'isolant, et de certains emballages recyclables). De manière générale, toutes les fins de vie alternatives à l'enfouissement envisagées dans cette étude permettent une réduction importante des déchets non dangereux éliminés (il reste toujours des déchets dus aux emballages, aux chutes, aux intrants consommables de la pyrogazéification et aux déchets d'arrière-plan des données secondaires utilisées).

L'incinération de la ouate (rendement >60%) avec récupération d'énergie en cogénération est relativement efficace pour la production d'énergie, cependant la pyrogazéification de la ouate fournit un gaz de process à fort PCI (16,86 MJ) qui pourrait également être exploité pour une valorisation énergétique, et ce malgré la part de gaz de process consommée par la pyrogazéification.

5.2. Flux de matières et d'énergie – Panneaux textile recyclé

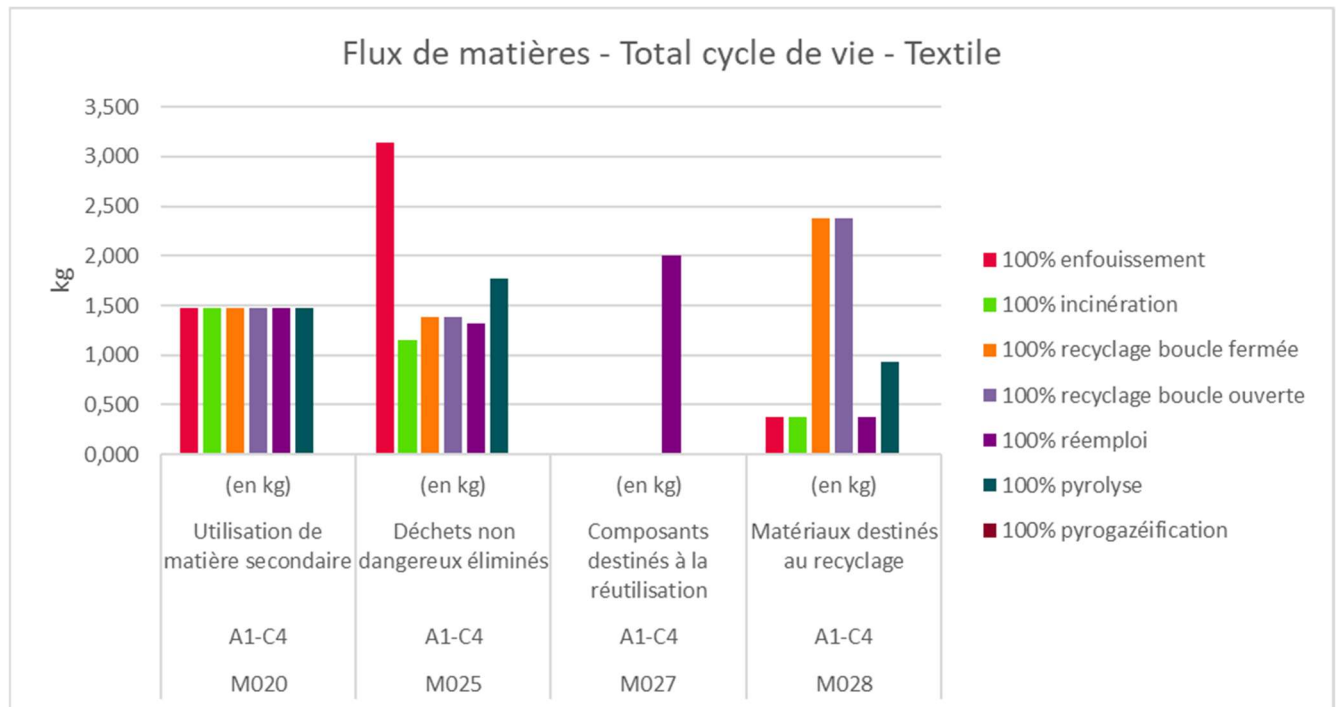


Figure 11 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux textiles

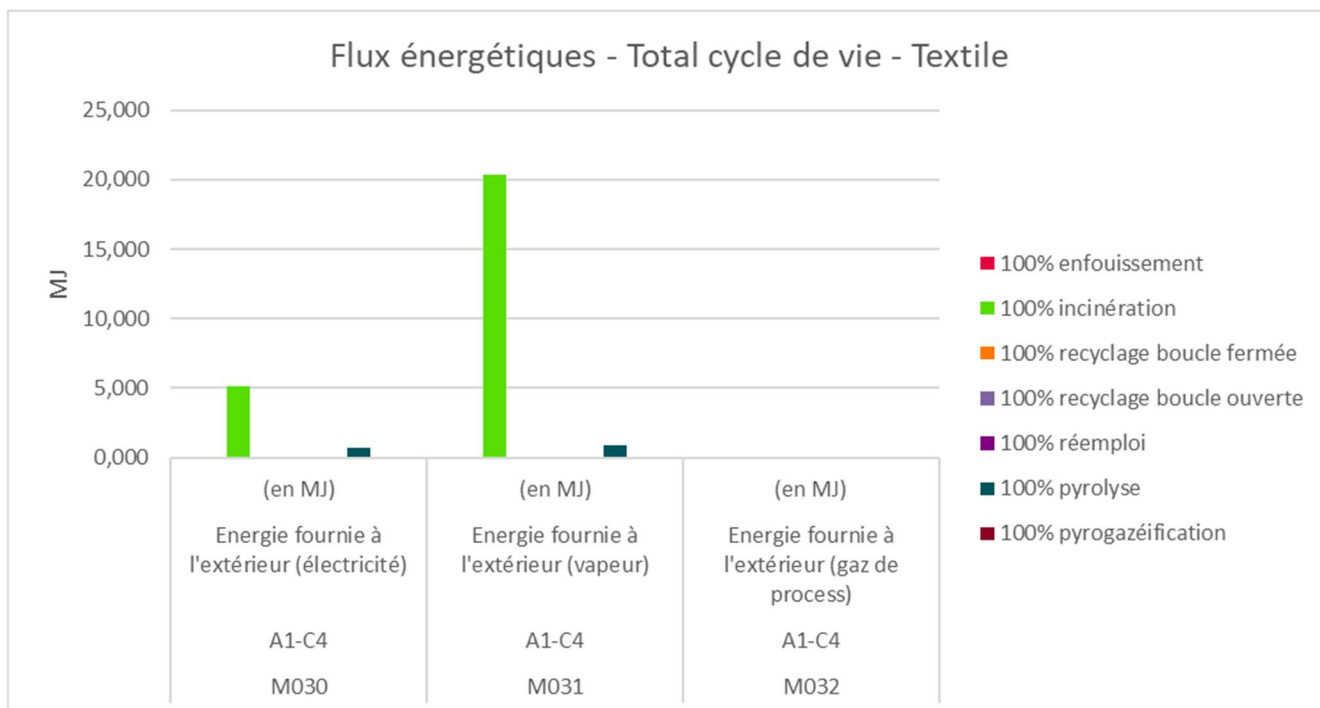


Figure 12 : Energie fournie à l'extérieur (textile)

Pour les panneaux textiles, l'interprétation des résultats sur les flux de matière est similaire à celle des résultats pour la ouate de cellulose, car il s'agit également de produits issus de matériaux recyclés, et dont la pyrolyse ne produit pas une biohuile exploitable. Tous les scénarios produisent une petite quantité de matériaux destinés au recyclage qui correspond aux palettes recyclées.

Dans le cas des panneaux textiles, pour lesquels la pyrogazéification n'a pas été considérée et pour lesquels le rendement de la pyrolyse en biohuile est quasi nul, seule l'incinération avec récupération d'énergie permet un valorisation énergétique valable.

5.3. Flux de matières et d'énergie – Panneaux de fibres de chanvre

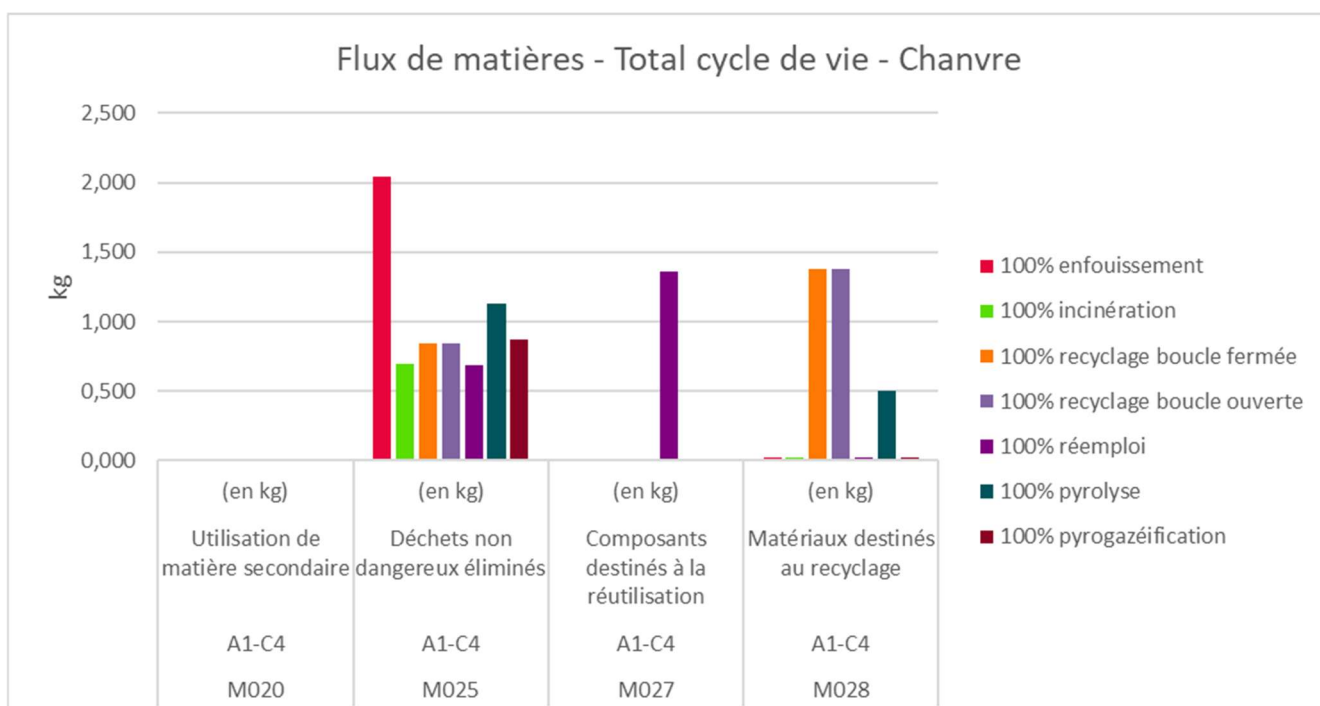


Figure 13 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux chanvre

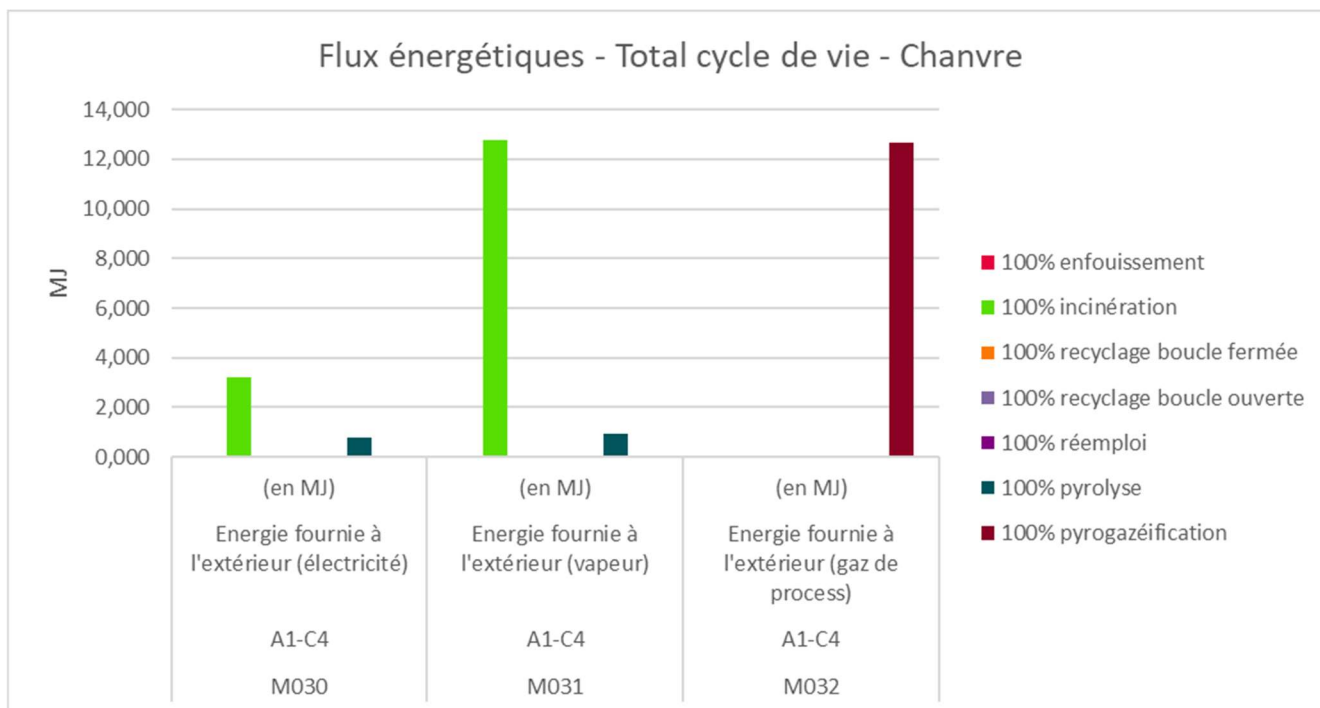


Figure 14 : Energie fournie à l'extérieur (chanvre)

Les panneaux en chanvre modélisés dans cette étude n'incorporent pas de matière secondaire. Comme précédemment, les scénarios de fin de vie alternatifs à l'enfouissement permettent une réduction importante des déchets non dangereux éliminés. Le syngaz produit par pyrogazéification ayant le PCI le plus faible parmi les produits étudiés (13,67 MJ/kg), le potentiel de valorisation énergétique par pyrogazéification est important mais inférieur à celui du scénario d'incinération avec récupération d'énergie.

5.4. Flux de matières et d'énergie – Panneaux de fibres végétales mixtes

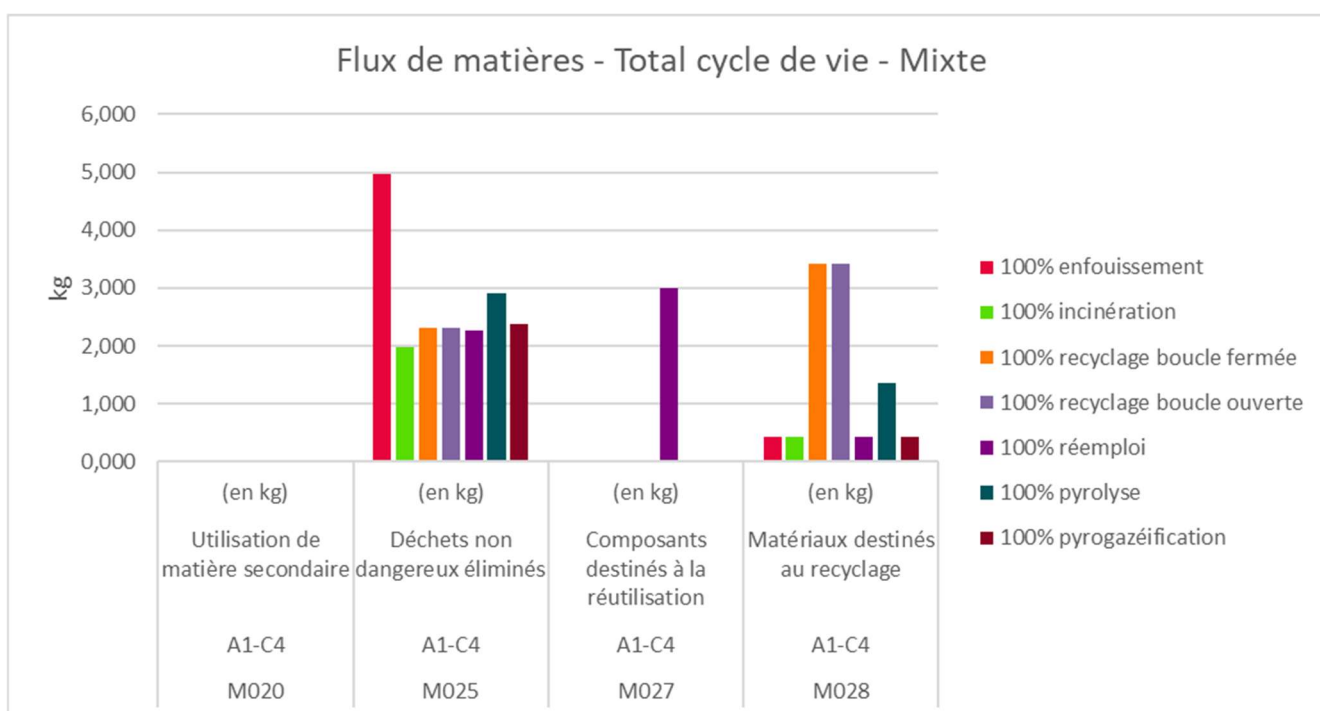


Figure 15 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux mixtes

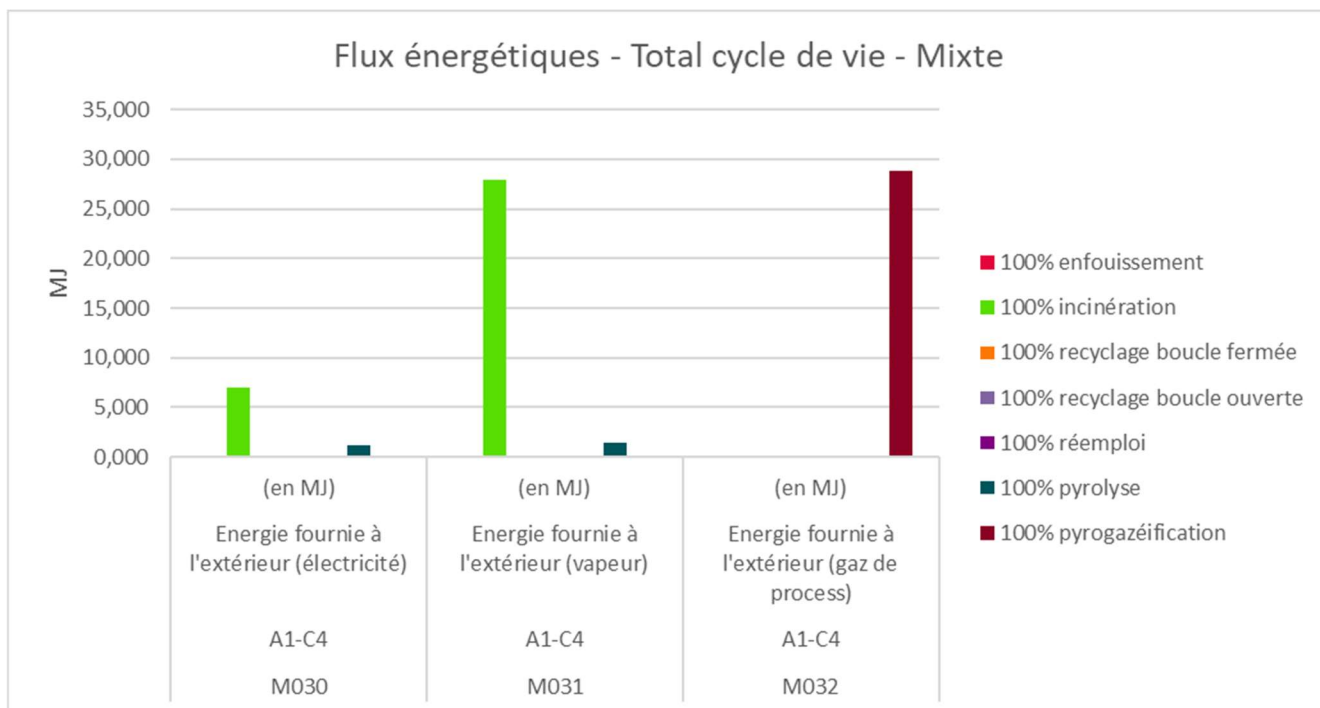


Figure 16 : Energie fournie à l'extérieur (mixte)

Les panneaux mixtes étant très similaires aux panneaux en chanvre, ainsi que leurs propriétés physicochimiques en pyrolyse et en pyrogazéification (PCI du syngaz de panneaux mixtes : 13,98 MJ/kg) les mêmes conclusions s'appliquent.

5.5. Flux de matières et d'énergie – Panneaux flexibles de fibres de bois

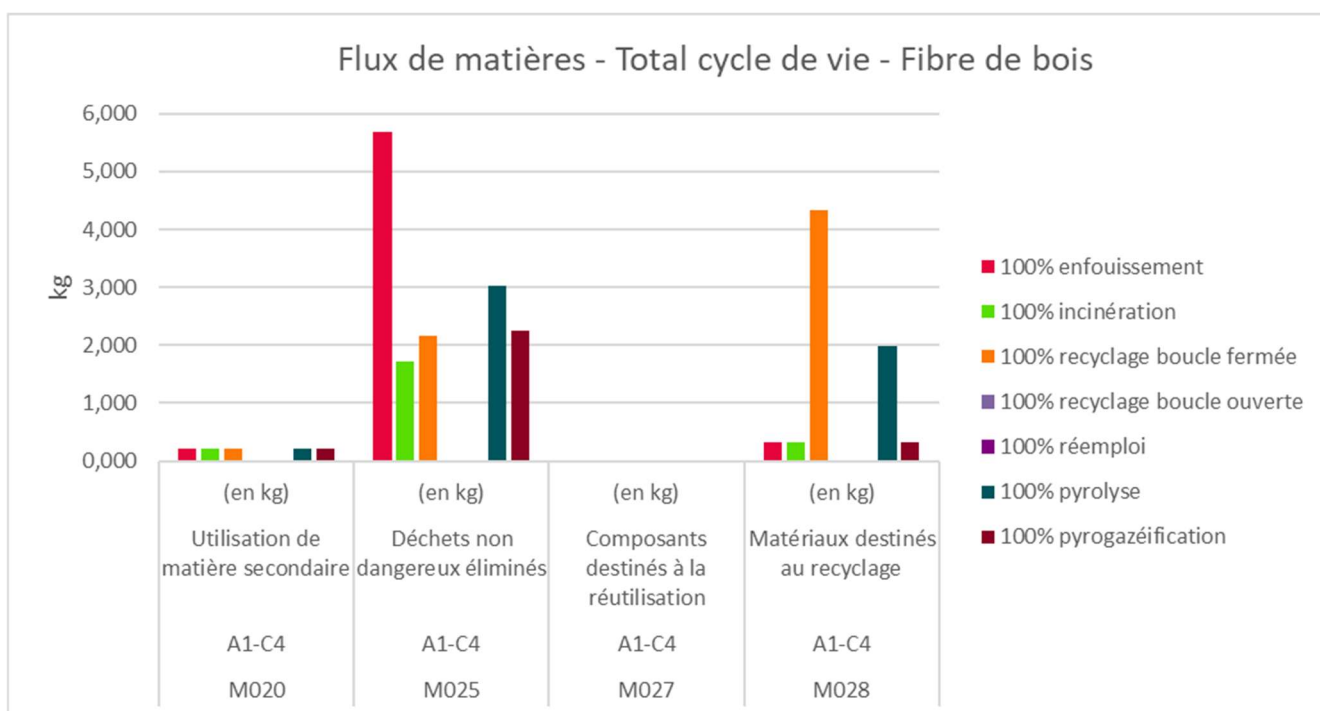


Figure 17 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux de fibre de bois

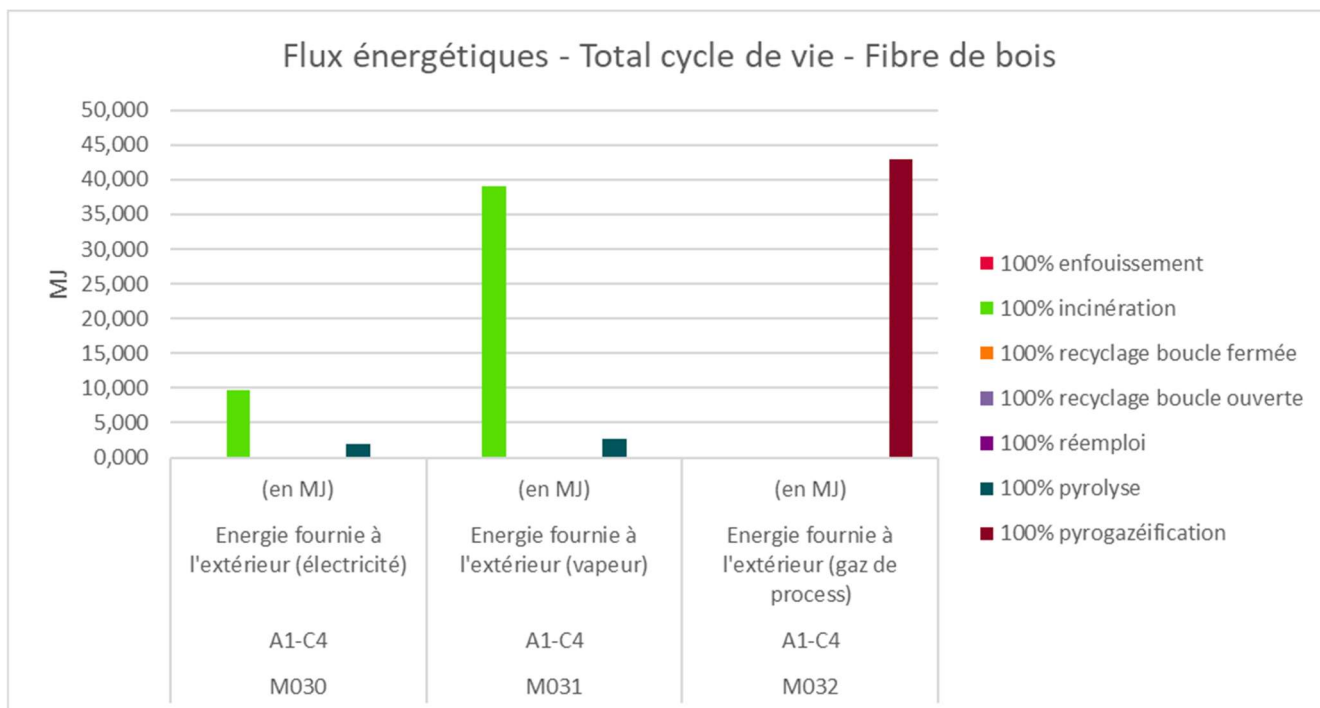


Figure 18 : Energie fournie à l'extérieur (fibre de bois)

Dans le cas des panneaux en fibre de bois, pour lesquels le réemploi et le recyclage en bouche ouverte ne sont pas envisagés, seul le recyclage en boucle fermée et la pyrolyse permettent une contribution à l'économie circulaire par la valorisation de la matière. Les panneaux de fibre de bois ont un PCI élevé (18,51 MJ/kg), produisent un gaz de pyrolyse ayant un PCI (10,48 MJ/kg) permettant d'alimenter en totalité le processus de pyrolyse, et produisent un syngaz à PCI relativement élevé (15,33 MJ/kg). Par conséquent, leur incinération avec récupération d'énergie fournit beaucoup d'énergie, mais les valorisations par pyrolyse et par pyrogazéification peuvent également être considérées.

5.6. Résultats sur les autres indicateurs de potentiels d'impacts

A titre indicatif, les résultats sur les autres indicateurs de potentiels d'impacts de la norme NF EN 15804+A1 sont disponibles en annexe. En résumé, pour toutes les familles de produits, les tendances observées sur les autres indicateurs d'impacts sont semblables à celles présentées en section 4.2.1 pour l'indicateur Utilisation de l'énergie renouvelable procédés. En effet, pour ces autres indicateurs d'impacts, les fins de vie de recyclage, de pyrolyse et de pyrogazéification présentent des impacts non négligeables, ce qui est probablement dû aux paramètres de consommations d'énergies requises et de transports longs utilisés dans cette étude. L'exception notable est l'indicateur Eutrophisation, pour lequel toutes les fins de vie alternatives étudiées sont largement moins impactantes que l'enfouissement. En particulier, la valorisation énergétique par incinération avec récupération d'énergie et le recyclage permettent de limiter fortement les impacts sur l'indicateur Eutrophisation. C'est également le cas du réemploi mais dans une moindre mesure en raison des palettes utilisées pour le reconditionnement du produit.

6. Conclusions et limites de l'étude

En conclusion, cette étude a permis, en combinaison avec les parties études technico-économiques et expérimentations en laboratoire du projet ValoMatBio, de **contribuer à informer les filières sur les voies de fin de vie les plus intéressantes**.

La **valorisation des produits au-delà du cycle de vie**, que cela soit par le réemploi, le recyclage en boucle ouverte ou fermée, ou par des méthodes de valorisation énergétiques novatrices, **est possible pour tous les matériaux étudiés**.

Cependant, plus les matériaux biosourcés sont mélangés intimement avec des fibres synthétiques, des adjuvants ou des produits de traitements, plus leurs options de traitement en fin de vie sont limitées. De plus, afin de garantir des impacts environnementaux limités, il est nécessaire que ces filières de fin de vie soient **bien réparties sur le territoire** afin de limiter les impacts des transports, et qu'elles **évitent au maximum les consommations énergétiques** (par exemple, électricité requise pour le recyclage, ou chaleur utilisée par la pyrolyse), ou en tout cas les énergies les plus carbonées. Enfin, les processus liés à la valorisation des déchets de pyrolyse et de pyrogazéification doivent être sélectionnés et optimisés avec soin afin de limiter leurs impacts et d'évaluer leur réel bénéfice environnemental.

Cette étude de modélisation ACV de la fin de vie des isolants biosourcés a cependant des **limites importantes** qu'il convient de garder en tête pour toute interprétation des résultats :

- Les modélisations des scénarios de fin de vie se basent pour la plupart sur des **scénarios encore peu répandus, non appliqués à grande échelle ou à échelle industrielle**, voire hypothétiques. Les FDES ne pouvant prendre en compte que des scénarios de fin de vie réalistes et issus de pratiques courantes, les scénarios présentés dans cette étude ne pourront donc pas être utilisés à court terme, tout au plus à moyen terme pour les filières de fin de vie en cours de mise en place (réemploi, réutilisation, recyclage), et à long terme pour les technologies de valorisation innovantes (pyrolyse, pyrogazéification).
- Les **sources de données utilisées pour la modélisation sont principalement bibliographiques**, ou issues des expériences réalisées à l'échelle du laboratoire et non à l'échelle industrielle.
- En conséquence des deux points précédents, une **approche conservatrice** a été choisie pour cette étude. Pour les distances de transport, les consommations énergétiques ou d'intrants, etc. **les valeurs choisies sont plutôt pénalisantes** et sélectionnées dans la partie haute de la fourchette de valeurs lorsqu'il y a incertitude.
- De nombreuses variantes des processus de pyrolyse (lente, rapide, etc.) et de pyrogazéification (fixed bed/fluidized bed, etc.) existent, des choix ont donc dû être faits et par conséquent, **la modélisation réalisée dans cette étude n'est pas représentative d'un process industriel en particulier**.
- Comme il est impossible d'envisager toutes les possibilités de valorisation de façon exhaustive, des **choix ont dû être faits pour déterminer à quels produits se substituent les déchets valorisés**. Les sources de chaleurs substituées par la valorisation énergétique des déchets (fioul, gaz, charbon) sont très carbonées, ce qui présente la valorisation énergétique des déchets biosourcés comme très bénéfique. Cette limite est également présente pour le choix des matériaux substitués pour le recyclage en boucle ouverte, ou dans le cas du biochar qui se substitue à un charbon actif d'origine fossile.
- Les bénéfices à réemployer ou à recycler en boucle fermée un produit biosourcé ne sont pas très « spectaculaires » sur l'indicateur Réchauffement climatique, puisque les impacts environnementaux de leur fabrication sur cet indicateur sont déjà assez faibles et que les matériaux réemployés ou recyclés se substituent donc à des produits peu impactants. Ainsi, le réemploi ou le recyclage sont des fins de vie intéressantes d'un point de vue environnemental bien que cela ne soit pas reflété de manière évidente par les résultats numériques d'impacts environnementaux de ces fins de vie. Il s'agit d'une limite commune à tous les travaux d'analyse de cycle de vie : il est important d'avoir du recul et de **prendre en compte le contexte complet de l'étude pour interpréter des résultats d'ACV**, et de **ne pas juger de la valeur d'une hypothèse sur la seule base des résultats numériques**.
- L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale multicritère, calculant des résultats d'impacts environnementaux sur une trentaine d'indicateurs dans le cas de la norme EN NF 15804 par exemple. Cependant, pour des raisons de concision de l'analyse, **seuls quelques indicateurs environnementaux témoins ont été utilisés dans cette étude**⁹. Si on considérait d'autres indicateurs (comme ceux liés à l'épuisement des ressources, ou à l'eau), les conclusions de l'étude seraient peut-être différentes pour certains scénarios et hypothèses.

Les conclusions de cette étude ont pour objectif de compléter et d'enrichir les autres analyses du projet ValoMatBio. Ainsi, un soin particulier doit être apporté à l'interprétation des résultats d'ACV, qui devraient toujours être considérés dans leur contexte d'étude et qui ne constituent pas à eux seuls des recommandations ou préconisations.

⁹ A titre indicatif, les résultats sur d'autres indicateurs sont disponibles en annexe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME. (2016). *Analyse du cycle de vie comparative de panneaux de porte automobiles biosourcé (PP/fibres de lin et de chanvre) et pétrosourcé (ABS)*.
- AFNOR. (2014). *NF EN 15804+A1, Contribution des ouvrages de construction au développement durable*.
- AFNOR. (2016). *NF EN 15804/CN, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclaration environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la norme NF EN 15804+A1*.
- AFNOR. (2019). *NF EN 15804+A2, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*.
- AFNOR. (2022). *NF EN 15804/CN, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction- Complément national à la norme NF EN 15804+A2*.
- La Maison Ecologique. (2015, Novembre-Décembre). *Guide pratique de l'isolation écologique. (Hors-série n°4)*.
- Ministère de la transition écologique. (2021). *Bilan énergétique de la France pour 2019*.
- RECORD. (2017). *Valorisation énergétique des déchets par voie thermochimique (pyrolyse, dépolymérisation, gazéification). Retour sur les développements passés et avis d'expert*.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des familles de produit étudiées	6
Tableau 2 : Conductivités thermiques et épaisseurs communes des familles de produit étudiées	8
Tableau 3 : Caractéristiques et composition des isolants biosourcés	12
Tableau 4 : Synthèse des recommandations pour la fin de vie de chaque type de produits	18
Tableau 5 : Scénarios de fin de vie pris en compte en ACV pour chaque type de produits	19
Tableau 6 : Détails des résultats d'ACV sur le module D pour les différentes valorisations après pyrolyse	24

FIGURES

Figure 1 : Modules du cycle de vie NF EN 15804+A1	8
Figure 2 : Processus inclus et étapes du cycle de vie NF EN 15804+A1	9
Figure 3 : Analyse de gravité des étapes A1-A5 pour la ouate en vrac	14
Figure 4 : Analyse de gravité des étapes A1-A5 pour les panneaux en textile recyclé	15
Figure 5 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux en fibres de chanvre	15
Figure 6 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux en fibres végétales mixtes	16
Figure 7 : Analyse de gravité pour les étapes A1-A5 pour les panneaux semi-rigides en fibre de bois	16
Figure 8 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Réchauffement climatique total pour les étapes C1-C4	20
Figure 9 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Energies non renouvelables procédés pour les étapes C1-C4	20
Figure 10 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Déchets non dangereux pour les étapes C1-C4	21
Figure 11 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Réchauffement climatique total pour le module D	22
Figure 12 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Energie non renouvelable procédés pour le module D	22
Figure 13 : Comparaison des impacts sur l'indicateur Déchets non dangereux pour le module D	23
Figure 14 : Flux de matières secondaires et de déchets de la ouate	25
Figure 15 : Energie fournie à l'extérieur (ouate)	25
Figure 16 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux textiles	26
Figure 17 : Energie fournie à l'extérieur (textile)	27
Figure 18 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux chanvre	27
Figure 19 : Energie fournie à l'extérieur (chanvre)	28
Figure 20 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux mixtes	28
Figure 21 : Energie fournie à l'extérieur (mixte)	29
Figure 22 : Flux de matières secondaires et de déchets des panneaux de fibre de bois	29
Figure 23 : Energie fournie à l'extérieur (fibre de bois)	30

SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
DEP	Déclaration Environnementale de Produit
DND	Déchets Non Dangereux éliminés
ENRP	Energie Non Renouvelable Procédés
EPD	Environmental Product Declaration
FDES	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
RC	Réchauffement Climatique (total)
RCF	Réchauffement Climatique Fossile

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Etude des Scénarios en fin de vie des isolants biosourcés

La nouvelle réglementation environnementale du bâtiment "RE2020" va entrer en vigueur à compter de juillet 2021. Elle intègre des évolutions extrêmement importantes qui devraient à terme profondément modifier le secteur de la conception et de la construction et faire évoluer la nature des produits et matériaux de construction les plus employés en faveur des isolants biosourcés

Le projet souhaite apporter des connaissances techniques et scientifiques sur ces matériaux et des recommandations vis-à-vis de leur fin de vie en analysant l'impact des différents scénarios de traitement lors de leur fin de vie.

Cette étude apporte des premiers enseignements sur les scénarios de gestion en fin de vie de différents types d'isolants biosourcés. Elle évalue l'impact des différents scénarios en fin de vie dans leur analyse de cycle de vie global de l'isolant biosourcé.

