

Rapport final
ANALYSE DU CYCLE DE VIE
DU RECHAPAGE DE PNEUS
GÉNIE CIVIL RÉALISÉ PAR
LANOTR



Crédit photo : LanOTR inc.

PRÉSENTÉ À

Daniel Marleau
Président-directeur général
LanOTR inc.
120 rue Faust
Lanoraie, Québec, J0K 1E0

PROPOSÉ PAR

Sidonie Carpier, professionnelle en génie
Esther Corvaisier-Drouart, professionnelle en génie
Charles Thibodeau, Ph. D.
CT Consultant
445, rue Manning
Montréal, Québec, H4H 1Z5

15 DÉCEMBRE 2023

À PROPOS DE CT CONSULTANT

MISSION

CT Consultant a pour mission d'accompagner les décideurs québécois et canadiens dans leur démarche d'amélioration de la performance environnementale de leurs activités, produits, services et bâtiments. À terme, cet accompagnement permet aux organisations d'augmenter leur rentabilité, d'améliorer leur image corporative et de contribuer à préserver l'environnement.

VALEURS

Nous sommes à l'écoute de vos besoins. Nous possédons les compétences, le professionnalisme et l'engagement nécessaires pour mener à bien votre projet. Pour assurer un climat de confiance, nous serons disponibles pour vous, vos questions et vos propositions.

SERVICES

Pour aider ses clients dans leurs objectifs d'affaires, **CT Consultant** offre les services suivants :

- Analyse environnementale du cycle de vie (ACV);
- Déclaration environnementale de produit (DEP);
- Inventaire des GES;
- Écoconception de produits et bâtiments;
- Conseils en économie circulaire;
- Accompagnement en responsabilité sociale et environnementale des organisations;
- Formation personnalisée.

CT Consultant étant inscrit au registre d'experts du Fonds Écoleader (www.fondsecoleader.ca), votre projet pourrait être admissible à une subvention allant jusqu'à 75 % du montant final.



RÉALISATIONS

Depuis sa création, CT Consultant a réalisé des projets pour des clients industriels, institutionnels, OBNL et des firmes de services dans plusieurs secteurs de l'économie. Pour voir un aperçu de nos projets, visitez le <https://www.ctconsultant.ca/realisations>

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. OBJECTIFS ET CHAMP D'ÉTUDE	2
1.1 OBJECTIFS DE L'ACV	2
1.2 CHAMP D'ÉTUDE	3
1.2.1 SERVICE DE RECHAPAGE DE PNEUS RÉALISÉ PAR LANOTR	3
1.2.2 UNITÉ DÉCLARÉE	6
1.2.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME	7
1.2.4 EXCLUSIONS ET CRITÈRES DE COUPURE	9
1.2.5 MÉTHODE D'ALLOCATION.....	10
2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE, SOURCES ET HYPOTHÈSES	11
2.1 COLLECTE ET SOURCES DE DONNÉES	11
2.2 DONNÉES ET HYPOTHÈSES CLÉS	11
2.3 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES	12
3. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS ET LOGICIEL D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE	14
4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU CYCLE DE VIE.....	15
5. ANALYSE DE CONTRIBUTION.....	16
6. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET RÉDUCTION DES IMPACTS DU RECHAPAGE PAR LANOTR	18
7. ÉTALONNAGE (BENCHMARKING)	20
8. LIMITES ET PISTES D'AMÉLIORATION	22
9. CONCLUSION.....	23
10. RÉFÉRENCES.....	25
ANNEXE 1 : ÉMISSIONS DE GES POUR LA FABRICATION DE PNEUS NEUFS - TOTALITÉ DES ÉTUDES RECENSÉES.....	27
ANNEXE 2 : COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE GES ET CO ₂ POUR LE RECHAPAGE	29

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Quatre phases d'une ACV (ISO 14040:2006 [1]).....	2
Figure 2 : Exemples de machinerie (chariot élévateur télescopique et camion rigide) qui utilisent des pneus génie civil rechapés par LanOTR	3
Figure 3 : Étapes du procédé de rechapage de pneus réalisées par LanOTR	4
Figure 4 : Photo d'un pneu rechapé par LanOTR	5
Figure 5 : Frontières du système	8
Figure 6 : Analyse de contribution	17
Figure 7 : Étalonnage (benchmarking) - Émissions de GES (kg éq. CO ₂) pour 1 kg de pneu neuf selon des ACV issus de la littérature vs émissions de GES du rechapage par LanOTR	21

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bilan des activités de rechapage de pneu génie civil effectué à LanOTR (2022)	5
Tableau 2 : Composition d'un pneu génie civil rechapé moyen par LanOTR	6
Tableau 3 : Étapes et modules du cycle de vie inclus et exclus de l'ACV	7
Tableau 4 : Processus inclus par module du cycle de vie	9
Tableau 5 : Processus exclus par module du cycle de vie	10
Tableau 6 : Évaluation de la qualité des données.....	13
Tableau 7 : Catégories d'impacts retenues de la méthode TRACI 2.1.....	15
Tableau 8 : Impacts environnementaux de la collecte, du rechapage et de la livraison de 1 kg de pneus génie civil.....	16
Tableau 9 : Analyse de sensibilité	20
Tableau 10 : Scores GES (kg éq. CO ₂) pour 1 kg de pneu neuf produit provenant d'ACV du berceau à la porte issues de la littérature et comparaison avec le score GES de la présente étude	28
Tableau 11 : Comparaison des émissions de GES (kg éq. CO ₂) et des émissions CO ₂ pour 1 kg de pneus rechapés avec ceux calculés dans la présente étude	29

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ACV	Analyse du cycle de vie
CFC-11	Trichlorofluorométhane
CO ₂	Dioxyde de carbone
DEP	Déclaration environnementale de produit
éq.	Équivalent
MJ	Mégajoule
N	Azote
O ₃	Ozone
PCR	Product Category Rules (Règles de catégories de produits)
SO ₂	Dioxyde de soufre

INTRODUCTION

Depuis 1976, l'entreprise LanOTR inc. propose des services de rechapage et de réparation de pneus génie civil (pneus pour machinerie lourde) à son usine de Lanoraie au Québec. Son service est offert à l'ensemble du Québec, la majorité de l'Ontario et également aux États-Unis.

Le service de rechapage de LanOTR est composé d'une collecte des pneus usagés, du rechapage des pneus et de leur livraison. Pour le rechapage, LanOTR utilise une technologie « à froid » qui permet la pose d'une nouvelle bande de roulement sur la carcasse du pneu à des températures avoisinant les 115 °C. La collecte et la livraison sont optimisées de façon à réduire les distances de transport. Au final, les activités de rechapage de pneus de LanOTR visent à produire des pneus rechapés de haute qualité et ainsi d'éviter l'achat de pneus neufs.

Dans l'objectif d'évaluer les potentiels bénéfiques sur l'environnement liés à son service de rechapage de pneus, LanOTR souhaite quantifier les impacts environnementaux de ses pneus génie civil rechapés au moyen d'une analyse du cycle de vie (ACV) et les comparer à ceux liés à la production de pneus neufs. Dans ce contexte, CT Consultant a été mandaté par LanOTR pour réaliser l'ACV de son service de rechapage de pneus génie civil, ainsi qu'un étalonnage (benchmarking) des impacts de ce service avec ceux liés à la production d'un pneu neuf.

L'ACV est réalisée en s'appuyant sur les exigences des normes ISO 14040:2006 [1] et ISO 14044:2006 [2], mais n'a pas fait l'objet d'une revue critique tel qu'il est prescrit dans le cas des affirmations comparatives.

Selon ISO 14040:2006 [1], les quatre phases d'une ACV (Figure 1) sont :

- **Définition des objectifs et du champ d'étude** : Cette phase permet de définir les objectifs et le champ d'étude afin d'exposer clairement les motivations pour réaliser cette ACV et le public visé, ainsi que le produit étudié, l'unité fonctionnelle (unité déclarée dans la présente ACV), les frontières du système et les autres choix méthodologiques.
- **Analyse de l'inventaire** : Un inventaire des flux entrants et sortants du système est réalisé en utilisant une combinaison de données primaires et secondaires collectées pour chaque processus du système.
- **Évaluation des impacts** : Cette phase vise à convertir les données d'inventaire en impacts environnementaux en utilisant des facteurs de caractérisation provenant d'une méthode d'évaluation des impacts.
- **Interprétation** : Cette phase comprend une évaluation de la qualité des données, une analyse de contribution, une analyse de sensibilité, une discussion sur les limites, ainsi que des pistes d'amélioration pour une éventuelle mise à jour de l'ACV.

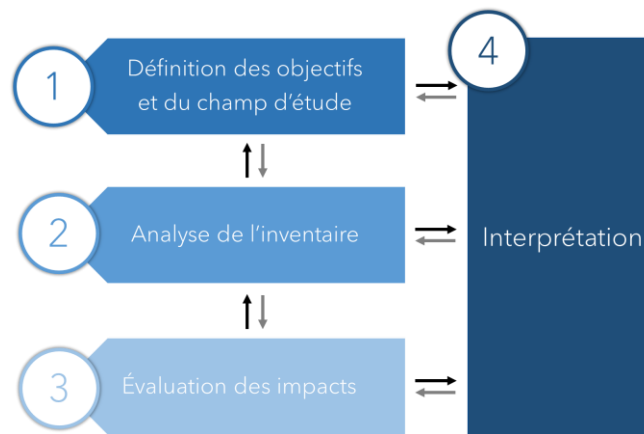


Figure 1 : Quatre phases d'une ACV (ISO 14040:2006 [1])

1. OBJECTIFS ET CHAMP D'ÉTUDE

1.1 OBJECTIFS DE L'ACV

L'objectif principal de cette ACV est de quantifier les impacts environnementaux du cycle de vie du rechapage de pneu génie civil effectué par LanOTR.

Les objectifs spécifiques de l'ACV sont les suivants :

- 1) Évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie de la collecte, du rechapage et de la livraison de pneus génie civil réalisé par LanOTR (section 4);
- 2) Identifier les principaux contributeurs aux différents scores d'impacts (« points chauds ») (section 5);
- 3) Réaliser une analyse de sensibilité des paramètres clés de l'ACV et une exploration de voies de réduction des impacts pour LanOTR (section 6);
- 4) Réaliser l'étalonnage (benchmarking) des impacts environnementaux du rechapage réalisé par LanOTR avec ceux liés à la fabrication de pneus neufs et spécifier les limites de cette comparaison (section 7).

Les applications de l'étude et le public visés sont les suivants :

- Informer LanOTR sur les avantages de son service de rechapage de pneus par rapport à l'achat de pneus neufs d'un point de vue du cycle de vie;
- Le public visé comprend les parties prenantes de LanOTR, tels que ses investisseurs, ses clients et ses employés. Il est notamment envisagé que les économies de GES estimées avec le recours au rechapage par rapport à l'achat de pneu neuf soient affichées sur les factures des clients. À ce sujet, des recommandations pour bien réaliser cette communication sont formulées.

1.2 CHAMP D'ÉTUDE

Le champ d'étude comprend l'ensemble des éléments à inclure dans l'étude et les décisions méthodologiques permettant de répondre aux objectifs de l'étude. Dans cette section, une description du service de rechapage de LanOTR est présentée, suivie de l'unité déclarée retenue pour l'étude, de la définition des frontières du système, des exclusions et critères de coupure retenus et de la méthode d'allocation utilisée.

1.2.1 SERVICE DE RECHAPAGE DE PNEUS RÉALISÉ PAR LANOTR

Le service de rechapage de pneus génie civil de LanOTR se divise en trois étapes :

1. Collecte des pneus usagés auprès des détaillants;
2. Rechapage des pneus usagés;
3. Livraison des pneus rechapés aux détaillants.

La collecte des pneus usagés est réalisée par un service de ramassage offert par LanOTR à sa clientèle de détaillants. Les détaillants sont localisés au Québec, en Ontario et aux États-Unis. LanOTR se spécialise dans le rechapage de pneus génie civil, c'est-à-dire les pneus utilisés par de la machinerie lourde telle que des camions articulés, des camions rigides, des chargeuses, des niveleuses ou des chariots élévateurs télescopiques.



Figure 2 : Exemples de machinerie (chariot élévateur télescopique et camion rigide) qui utilisent des pneus génie civil rechapés par LanOTR

Le procédé de rechapage des pneus génie civil de LanOTR est de type rechapage « à froid » et est composé de plusieurs étapes (Figure 3). Tout d'abord, une inspection est effectuée afin de déterminer si le pneu usagé peut être rechapé et s'il y a des réparations à effectuer avant le rechapage. Les pneus trop abîmés pour être rechapés sont renvoyés au détaillant sans intervention. Une fois le pneu usagé inspecté, le râpage permet le retrait de l'ancienne semelle du pneu.

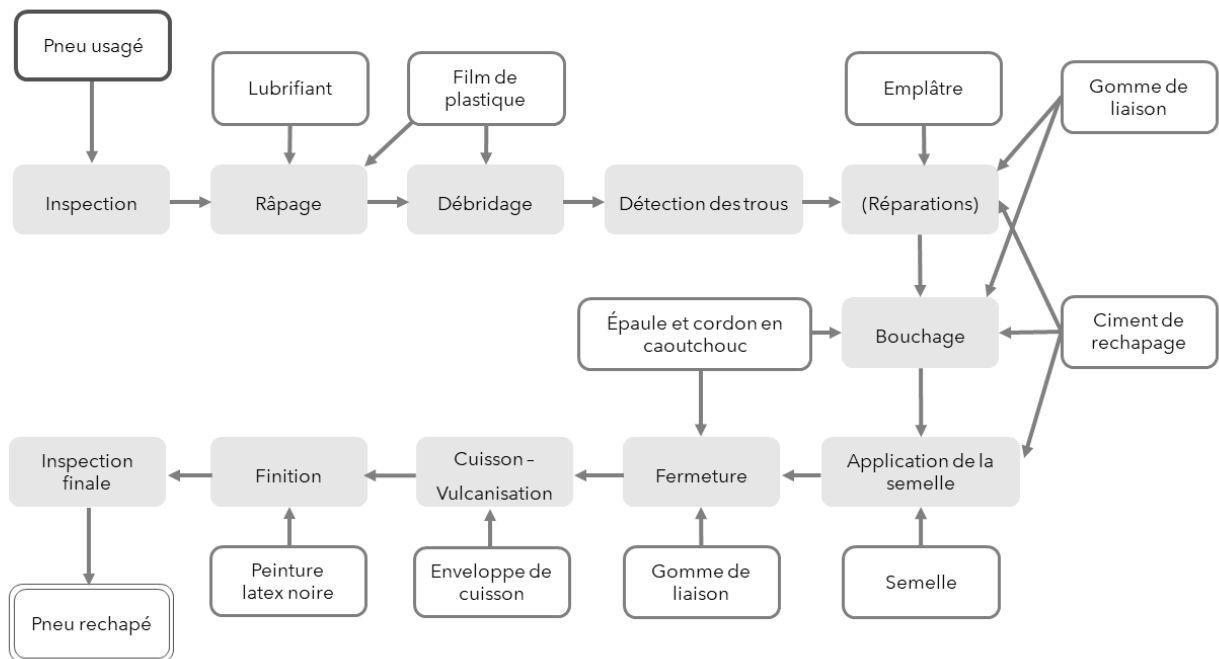


Figure 3 : Étapes du procédé de rechapage de pneus réalisées par LanOTR

Le résidu de semelle râpée est remis à un fabricant de produits de caoutchouc tels que des tapis. Une fois râpé, le pneu se voit apposer un film de plastique (polyfilm) sur la surface râpée pour éviter la contamination avant d'entamer l'étape suivante. Le pneu subit ensuite un processus de débridage effectué à l'aide d'une meuleuse : après avoir retiré le film de plastique de protection, la surface râpée est préparée pour optimiser l'adhésion de la future semelle et les fissures sont arrondies pour stopper leur propagation. Un nouveau film de plastique est déposé à la surface pour éviter la contamination. À l'aide du Lano-Detect, un appareil conçu par LanOTR, le pneu passe par une nouvelle étape de vérification permettant de détecter les trous invisibles à l'œil nu. Si des réparations s'avèrent nécessaires, elles sont effectuées à l'aide d'emplâtres (patches en nylon et en caoutchouc), de ciment de rechapage (mélange d'heptane, de caoutchouc, de noir de carbone et de styrène-butadiène-styrène) et de gomme de liaison. Le film de plastique est ensuite retiré pour effectuer le bouchage : du caoutchouc (cordon de caoutchouc, épaules de caoutchouc et gomme de liaison) et du ciment de rechapage sont ajoutés afin de rendre la surface du pneu égale pour bien adhérer à la semelle. La nouvelle semelle en caoutchouc est collée manuellement au pneu à l'aide de ciment de rechapage, puis un technicien comble les espaces vides à l'aide de caoutchouc et de gomme de liaison. Le pneu avec la nouvelle semelle collée est mis dans une enveloppe de cuisson et est chauffé dans un autoclave électrique à basse température (environ 115°C [3]) pour assurer la cohésion entre la semelle et la carcasse (vulcanisation). Finalement, le pneu rechapé est inspecté et une peinture au latex noire est appliquée à des fins esthétiques.

Pour l'année 2022, le bilan des activités de rechapage de LanOTR comprend le ramassage de 2900 pneus usagés et le rechapage de 2668 pneus (Tableau 1). En plus du rechapage, LanOTR effectue également la réparation de pneus génie civil (réparation seule, sans rechapage). La réparation seule n'est pas comprise dans le champ d'étude.

Tableau 1 : Bilan des activités de rechapage de pneu génie civil effectué à LanOTR (2022)

Paramètre	Valeur
Quantité de pneus génie civil usagés recueillis	2 900 pneus/an
Quantité de pneus génie civil rechapés produits	2668 pneus/an
Quantité de pneus génie civil non rechapables (pneus renvoyés aux détaillants tel quel)	232 pneus/an (8 % des pneus entrants)
Part du temps d'usine dédiée au rechapage	85 %
Part du temps d'usine dédiée au réparation ¹	15 %

Les pneus rechapés par LanOTR sont de tailles et de masses variables (Figure 4). Le pneu à l'étude est un pneu génie civil « moyen » correspondant à une moyenne des 2668 pneus rechapés par l'entreprise en 2022. Ses dimensions sont de 23,5R25 (68 pouces x 24 pouces x 68 pouces) et la masse moyenne est de 317,7 kg. Les semelles utilisées par LanOTR sont faites de caoutchouc synthétique ou naturel et ont des sculptures variables selon les modèles. La semelle de rechapage la plus fréquemment utilisée par LanOTR est le modèle 4 saisons LSNOW L2/G2 dont l'épaisseur varie entre 1,09 et 1,31 pouces (2,77 à 3,32 cm).



Figure 4 : Photo d'un pneu rechapé par LanOTR

¹ Le temps d'usine dédié à la réparation représente une activité de réparation seule (non couvert dans le champ d'étude). Le temps alloué à la réparation dans le cadre des activités de rechapage a quant à lui été comptabilisé dans le temps alloué au rechapage.

Tableau 2 : Composition d'un pneu génie civil rechapé moyen par LanOTR

Substance	Part de la masse
Pneu usagé	82,8 %
Semelle de caoutchouc	11,8 %
Gomme de liaison et cordon de caoutchouc	3,0 %
Ciment de rechapage	2,1 %
Épaules de caoutchouc	< 1 %
Emplâtres	< 0,1 %
Peinture au latex noire	< 0,1 %
Lubrifiant	< 0,1 %
Total	100 %

Une fois le rechapage terminé, la livraison des pneus rechapés est prise en charge par LanOTR. Il est à souligner que la livraison des pneus rechapés a lieu en même temps que la collecte des pneus usagés à rechapier. Les pneus rechapés sont livrés sans emballage.

1.2.2 UNITÉ DÉCLARÉE

Pour la présente ACV, l'unité déclarée, c'est-à-dire la quantité de service fournie par LanOTR utilisée comme unité de référence pour la comptabilisation des impacts environnementaux [4], est la suivante :

« Réaliser la collecte, le rechapage et la livraison de 1 kg de pneu génie civil moyen². »

Par ailleurs, il est à souligner que cette unité déclarée n'a pas pris en considération la production et l'utilisation du pneu d'origine (avant l'activité de rechapage), comme l'ont fait d'autres ACV [5,6]. En effet, ces ACV ont utilisé une approche alternative visant à comparer deux scénarios considérant des cycles de vie complets de pneus : 1) production et utilisation d'un pneu neuf qui subit ensuite un rechapage et 2) production et utilisation de deux pneus neufs. Bien que cette approche alternative soit pertinente puisqu'elle prend en considération l'ensemble du cycle de vie du pneu rechapé, celle-ci n'a pas été retenue dans la présente ACV, puisqu'elle ne répondait pas à l'objectif de l'étude qui consistait à déterminer l'impact spécifique lié au service de rechapage du pneu tel que pratiqué par LanOTR.

² La masse des pneus génie civil rechapés étant variable d'un modèle à l'autre, l'unité déclarée retenue se rapporte à 1 kg pour être applicable aux différents pneus génie civil utilisés.

1.2.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME

La détermination des frontières du système a été réalisée de façon à répondre aux objectifs de l'étude. Le système évalué comprend ainsi les trois étapes du service de rechapage de pneus génie civil de LanOTR. Selon la nomenclature des étapes du cycle de vie des normes EN 15804:2013 [7] et ISO 21930:2017 [8], ces étapes du service de rechapage correspondent à quatre modules du cycle de vie (A1, A2, A3 et A4) (Tableau 3). Ainsi, les autres modules du cycle de vie, tels qu'identifiés par ces normes, sont exclus du système évalué. La Figure 5 représente de manière synthétique les différents éléments inclus dans chaque module du cycle de vie considéré pour cette ACV et le Tableau 4 liste l'ensemble des activités considérées. L'exclusion de la phase d'utilisation est discutée à la section 8 - Limites et pistes d'amélioration.

Tableau 3 : Étapes et modules du cycle de vie inclus et exclus de l'ACV

ÉTAPE DE PRODUCTION (A1-A3)			ÉTAPE DE TRANSPORT ET D'INSTALLATION (A4-A5)		ÉTAPE D'UTILISATION (B1-B7)							ÉTAPE DE FIN DE VIE (C1-C4)			AU-DELA DU CYCLE DE VIE DE VIE	
Production des matières premières	Transport des matières premières	Rechapage en usine	Transport au détaillant	Installation	Utilisation	Maintenance	Réparation	Remplacement	Rénovation	Utilisation d'énergie	Utilisation d'eau	Désinstallation	Transport au site de traitement	Traitement des déchets	Élimination	Bénéfices liés à la réutilisation / recyclage / récupération d'énergie
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

x : Module inclus dans l'ACV

- : Module exclu de l'ACV

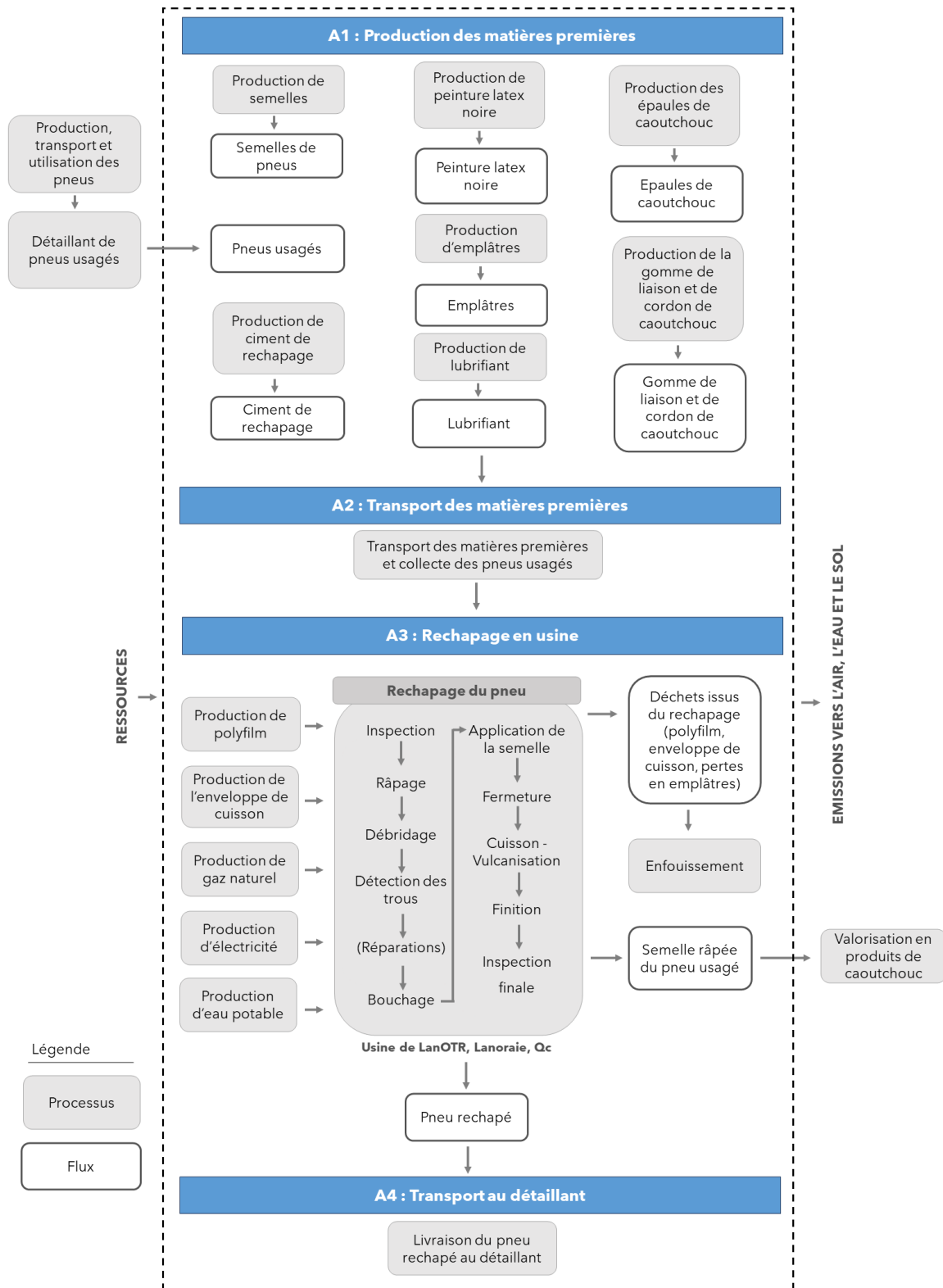


Figure 5 : Frontières du système

Tableau 4 : Processus inclus par module du cycle de vie

A1 - Production des matières premières
A1.1 Pneus génie civil usagés
A1.2 Production des emplâtres
A1.3 Production des semelles
A1.4 Production du ciment de rechapage
A1.5 Production de la gomme de liaison et du cordon de caoutchouc
A1.6 Production des épaules de caoutchouc
A1.7 Production de lubrifiant
A1.8 Production de peinture au latex noire
A2 - Transport des matières premières
A2.1 Transport des matières premières
A2.1.1 Transport des emplâtres
A2.1.2 Transport des semelles
A2.1.3 Transport du ciment de rechapage
A2.1.4 Transport de la gomme de liaison et du cordon de caoutchouc
A2.1.5 Transport des épaules de caoutchouc
A2.1.6 Transport de lubrifiant
A2.1.7 Transport de peinture au latex noire
A2.2 Transport des pneus usagés (collecte des pneus)
A3 - Rechapage à l'usine
A3.1 Infrastructure et machines
A3.2 Énergie et eau
A3.3 Matériaux auxiliaires
A3.4 Déchets
A3.5 Semelle râpée du pneu usagé
A4 - Transport au détaillant (livraison des pneus rechapés)

1.2.4 EXCLUSIONS ET CRITÈRES DE COUPURE

La réalisation d'un inventaire du cycle de vie implique souvent l'exclusion d'éléments dont la contribution aux résultats est considérée négligeable selon des critères strictes et uniformes. Dans cette étude, des exclusions ont été faites si les critères de coupure suivants étaient atteints :

- **Masse** : s'il est prévu qu'un flux représente moins de 1 % de la masse totale des intrants, il peut être exclu ;
- **Énergie** : s'il est prévu qu'un flux représente moins de 1 % de l'énergie cumulée, il peut être exclu ;

Sur cette base et suivant d'autres considérations méthodologiques, certains processus ont été exclus (Tableau 5).

Tableau 5 : Processus exclus par module du cycle de vie

Module du cycle de vie	Exclusion	Justification
A1	Activités des clients où les pneus génie civil sont récupérés	Selon la norme EN 15804:2013 [7], les frontières du système doivent suivre le principe « pollueur payeur », c.-à-d. que les processus de traitement des déchets doivent être affectés au système qui les a générés jusqu'à ce que le statut de « fin de déchet » soit atteint. Le statut de « fin de déchet » est atteint lorsque le matériau ou produit acquiert une valeur économique et est utilisé à des fins spécifiques. Suivant ce principe, les activités des clients où les pneus sont récupérés sont exclues de cette étude, puisque les pneus acquièrent le statut de « fin de déchet ».
A1	Emballages des matières premières	En deçà des critères de coupure
A3	Entretien de l'infrastructure et des équipements de l'usine de LanOTR	En deçà des critères de coupure
A3	Transport des employés pour venir travailler à l'usine de LanOTR	Hors du champ d'étude
A3	Activités de support (p. ex. gestion, R&D, marketing, finance) de l'entreprise	Hors du champ d'étude

1.2.5 MÉTHODE D'ALLOCATION

Lorsqu'un processus dans le cycle de vie d'un produit génère plusieurs extrants (processus multifonctionnels), ou est relié à un autre système (cycle de vie d'un produit hors des frontières du système étudié), l'impact environnemental du processus doit être alloué aux différents produits, coproduits et systèmes. L'approche retenue est celle par règle de coupure (« cut-off »), telle que définie par la norme ISO 21930:2017 [8]. Cette approche spécifie que les impacts associés aux matériaux secondaires qui entrent dans le système évalué sont attribuables au système les ayant générés et que les bénéfices associés au recyclage des matières générés dans le système évalué sont exclus. Dans cette étude, les pneus usagés récupérés auprès des détaillants entrent dans le système évalué avec un impact nul. Ainsi, ne sont comptabilisés que les impacts de la collecte des pneus usagés depuis les détaillants de pneus génie civil à LanOTR. Quant au résidu de semelle râpée, aucun bénéfice ou impact environnemental n'est attribuable au traitement de celui-ci puisqu'il est remis à un fabricant de produits de caoutchouc sans contrepartie financière. Seul le transport jusqu'au fabricant de produits de caoutchouc est attribuable à LanOTR.

Conformément à l'approche par règle de coupure, la base de données Ecoinvent v3.9.1 utilisée est « Allocation, cut-off by classification », qui attribue les impacts des matières secondaires entrant dans le système à ceux qui les ont générées et exclut les bénéfices associés au recyclage des matières [8].

2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE, SOURCES ET HYPOTHÈSES

2.1 COLLECTE ET SOURCES DE DONNÉES

Les données primaires et secondaires ont été recueillies pour tous les processus à l'intérieur des frontières du système afin de réaliser l'inventaire. Une attention particulière a été portée à l'utilisation des données les plus représentatives possibles.

La collecte de données a débuté en février 2023 et s'est terminée en septembre 2023. Les données primaires sont représentatives de l'année 2022 et concernaient la collecte et le retour des pneus génie civil usagés au détaillant ainsi que les matières premières utilisées, la quantité de semelle râpée produite et les intrants associés au processus de rechapage. Ces données ont été collectées auprès de LanOTR de manière itérative à l'aide d'un fichier de collecte sous format Excel. Cette feuille de calcul cartographiait toutes les entrées et sorties de matières, d'eau et d'énergie pour les différents processus, ainsi que les informations décrivant les étapes du procédé de rechapage de pneus. Des données secondaires ont été utilisées pour modéliser tous les autres processus inconnus et non contrôlés par LanOTR (p. ex. processus en amont, tels que la fabrication des matières premières). Les données secondaires proviennent de la base de données Ecoinvent v3.9.1 [9], une des bases de données d'inventaire du cycle de vie les plus transparentes et parmi les plus reconnues au monde. Ecoinvent est également la seule base de données qui inclut des données spécifiques au contexte québécois.

2.2 DONNÉES ET HYPOTHÈSES CLÉS

La réalisation d'une ACV implique l'utilisation d'une grande quantité de données primaires, dont certaines ont un rôle prépondérant dans les résultats obtenus. De plus, lorsque des données sont incomplètes ou manquantes, plusieurs hypothèses doivent être formulées. Dans le cadre de cette ACV, les principales données et hypothèses utilisées sont :

- Le transport pour la collecte des pneus génie civil usagés (A2), y compris le retour des pneus trop abimés pour être rechapés, et la livraison des pneus rechapés (A4) est effectué par camion depuis et vers les détaillants sur un même circuit. Ce transport est optimisé de telle façon que la livraison du pneu rechapé soit effectuée lorsque le détaillant a de nouveaux pneus usagés à faire rechapier. Ces deux étapes de transport

(collecte et livraison) ont été modélisées à l'aide de la consommation annuelle totale de diesel des camions de LanOTR.

- Étant donné que le type de caoutchouc utilisé pour les semelles n'est pas connu, il est considéré que ce caoutchouc est fait à 100 % de caoutchouc synthétique. Cette hypothèse a fait l'objet d'une analyse de sensibilité (section 6).
- La modélisation du caoutchouc synthétique utilisé par LanOTR (semelles, gomme de liaison, cordon de caoutchouc, épaules de caoutchouc et composant en caoutchouc du ciment de rechapage) est basée sur les impacts environnementaux issus de la méthode d'évaluation des impacts TRACI 2.1 tiré du PCR (*Product category rules*) sur les pneus de UL Environment [10].
- Les impacts du caoutchouc synthétique présentés dans le PCR incluent la vulcanisation [10] et ceux-ci ont servi à modéliser l'ensemble des composants en caoutchouc achetés par LanOTR. Toutefois, il est à noter que certains composants en caoutchouc (emplâtre, ciment de rechapage, gomme de liaison, cordon de caoutchouc et épaules de caoutchouc) n'ont pas fait l'objet d'une vulcanisation avant leur achat par LanOTR pour le rechapage. Ainsi, il doit être souligné que les impacts des composants en caoutchouc non vulcanisés utilisés par l'entreprise sont considérés comme légèrement surestimés.
- Les emplâtres utilisés pour la réparation des pneus ont été considérés comme étant constitués de 50 % (part massique) de caoutchouc et 50 % de nylon.
- Il est considéré qu'il n'y a aucune perte de matières premières mis à part les emplâtres pouvant se décoller des pneus (0,5 % part massique).
- Les enveloppes de cuisson utilisées par LanOTR sont réutilisées jusqu'à leur fin de vie utile et sont ensuite destinées à l'enfouissement.
- Il n'y a aucune émission à l'air prévue lors du processus de rechapage.
- Il a été considéré que l'infrastructure de l'usine de LanOTR avait une durée de vie de 50 ans et que les équipements ont une durée de vie de 25 ans.
- Selon le PCR Part A (règles pour les ACV et déclarations environnementales de produits de la construction), les flux entrants et sortants du système doivent être comptabilisés sur une période de 100 ans. Ainsi, les émissions à long terme des processus d'enfouissement (au-delà de 100 ans après le dépôt du matériau dans le site d'enfouissement) ont été exclues [10].

2.3 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES

L'évaluation de la qualité des données est une étape importante de l'ACV puisque la confiance envers les résultats obtenus dépend de la qualité des données utilisées. La méthode retenue

pour l'évaluation de la qualité des données est une méthode qualitative et comprend cinq critères : représentativité géographique, représentativité temporelle, représentativité technologique, complétude et précision (Tableau 6).

Tableau 6 : Évaluation de la qualité des données

Critère	Évaluation
Représentativité géographique	Les données primaires liées aux étapes de collecte, de rechapage et de livraison des pneus génie civil représentent le contexte spécifique de LanOTR. Les données secondaires ont été sélectionnées afin d'être les plus représentatives possible du contexte géographique du rechapage de pneus génie civil par LanOTR. Des données secondaires représentatives du contexte québécois ont été sélectionnées en priorité (p. ex. utilisation de gaz naturel et d'électricité à l'usine de LanOTR), sinon des données représentatives du marché mondial ont été utilisées (p. ex. la production de caoutchouc synthétique, de film plastique ou de nylon). La représentativité géographique est considérée comme élevée.
Représentativité temporelle	Les données primaires sont représentatives de l'année de référence (année 2022). Les données secondaires (issues de Ecoinvent v3.9.1) sont jugées suffisamment récentes (c'est-à-dire publiées il y a moins de 10 ans). Ainsi, la qualité des données primaires et secondaires est considérée comme satisfaisante en termes de représentativité temporelle.
Représentativité technologique	Les données primaires relatives aux technologies de rechapage de pneus sont basées sur des données mesurées par LanOTR. Les données secondaires ont été sélectionnées afin de caractériser le plus fidèlement possible ces technologies. Les données primaires sont considérées comme ayant une représentativité technologique élevée et les données secondaires sont considérées comme ayant une représentativité technologique satisfaisante. Globalement, la représentativité technologique est jugée satisfaisante pour répondre aux objectifs de l'étude.
Complétude	Les données sélectionnées pour représenter chaque module du cycle de vie sont considérées comme suffisante pour garantir la complétude de chaque module. Tous les processus dont la masse et l'énergie se situent au-delà du seuil de coupure (1 %) ont été inclus dans l'ACV.
Précision	Les données primaires reposent essentiellement sur des données mesurées et sont ainsi jugées comme étant suffisamment précises pour répondre aux objectifs de l'étude. Il est à noter que certaines hypothèses ont été utilisées par manque de données précises (voir section 2.2). Pour les données secondaires relatives aux matières, à l'énergie et aux transports, la précision est jugée satisfaisante.

Sur la base de cette évaluation, la qualité des données est jugée satisfaisante et répond aux objectifs de l'étude. Certaines pistes d'amélioration ont été énoncées à la section 8 afin d'augmenter la qualité des données advenant une mise à jour de la présente ACV.

3. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS ET LOGICIEL D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'évaluation des impacts du cycle de vie vise à mesurer les impacts environnementaux du système étudié à l'aide d'une méthode d'évaluation des impacts. Celle-ci fournit des facteurs de caractérisation qui représentent le degré d'impacts de centaines de substances échangées avec l'environnement réparties en différentes catégories d'impacts.

Dans la présente ACV, la méthode d'évaluation des impacts TRACI 2.1 a été sélectionnée [11]. Cette méthode mesure les impacts potentiels des différents facteurs de stress environnementaux sur le territoire des États-Unis, mais est également utilisée dans le cadre d'ACV portant sur le contexte canadien. À titre d'exemple, les déclarations environnementales de produits (DEP) portant sur des produits de construction fabriqués en Amérique du Nord ont recours à cette méthode. Six des dix catégories d'impacts que compte TRACI 2.1 ont été retenues sur la base de leur représentativité élevée des mécanismes environnementaux réels [12].

Les catégories d'impacts utilisées pour la présente ACV sont :

- 1) *Potentiel de réchauffement climatique* [kg éq. CO₂];
- 2) *Potentiel d'acidification* [kg éq. SO₂];
- 3) *Potentiel d'eutrophisation* [kg éq. N];
- 4) *Potentiel de formation de smog* [kg éq. O₃];
- 5) *Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone* [kg éq. CFC-11];
- 6) *Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)* [MJ];

Pour chacune de ses catégories d'impacts, le nom anglais et la définition sont fournis au Tableau 7. La notion d' « impact potentiel » signifie que les scores d'impacts obtenus ne représentent pas des impacts réellement mesurés, mais sont les résultats d'une modélisation théorique. Par souci d'alléger le texte, le terme « potentiel » ne sera pas utilisé dans la suite du rapport.

Tableau 7 : Catégories d'impacts retenues de la méthode TRACI 2.1

Catégorie d'impacts	Nom anglais de la catégorie dans TRACI 2.1	Définition
Potentiel de réchauffement climatique (100 ans)	<i>Global warming potential</i>	Cet indicateur mesure l'impact sur le climat mondial d'une hausse de la température moyenne de l'atmosphère engendrée par les émissions de gaz à l'effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre sont : CO ₂ , CH ₄ , et N ₂ O [11].
Potentiel d'acidification	<i>Acidification potential</i>	Cet indicateur mesure l'impact d'une augmentation de la concentration en ions hydrogène (H ⁺) dans les sols ou les milieux aquatiques causée par l'émission de substances acidifiantes (par exemple, l'acide sulfurique) [11].
Potentiel d'eutrophisation	<i>Eutrophication potential</i>	Cet indicateur mesure les conséquences d'un enrichissement des milieux aquatiques par des nutriments (nitrates et phosphates), favorisant la croissance d'algues détériorant l'écosystème aquatique [11].
Potentiel de formation de smog	<i>Smog formation potential</i>	Cet indicateur mesure la formation de smog (ozone (O ₃) troposphérique), un polluant ayant un impact sur le système respiratoire. Le smog est formé par l'exposition d'oxydes d'azote (NO _x) et de composés organiques volatils (COV) au rayonnement solaire [11].
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone	<i>Ozone depletion potential</i>	Cet indicateur mesure l'impact d'un appauvrissement de la couche d'ozone, gaz qui protège les organismes vivants des radiations solaires. Cet appauvrissement de la couche d'ozone est causé principalement par les émissions de chlorofluorocarbures (CFC) et de halons [11].
Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)	<i>Abiotic depletion potential (fossil resources)</i>	Cet indicateur mesure l'épuisement des ressources énergétiques abiotiques (fossiles) et se calcule selon le surplus d'énergie nécessaire pour extraire ces ressources dans le futur [11].

Le logiciel d'analyse du cycle de vie openLCA v2.0.2 développé par GreenDelta [13] a été utilisé pour construire le modèle et extraire les résultats de l'ACV en utilisant la méthode d'évaluation des impacts TRACI 2.1.

4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU CYCLE DE VIE

Les impacts environnementaux du cycle de vie sont exprimés sur la base de l'unité déclarée, c'est-à-dire « Réaliser la collecte, le rechapage et la livraison de 1 kg de pneu génie civil moyen ». Ils sont présentés pour six catégories de la méthode d'évaluation des impacts TRACI 2.1 (Tableau 8). Cette section poursuit l'objectif spécifique 1.

Tableau 8 : Impacts environnementaux de la collecte, du rechapage et de la livraison de 1 kg de pneus génie civil

Catégorie d'impacts	Impact total	A1 - Production des matières premières	A2 - Transport des matières premières + A4 - Transport au détaillant	A3 - Rechapage à l'usine	Indicateur
Réchauffement climatique	8,0E-1	5,5E-1	1,9E-1	6,5E-2	kg éq. CO ₂
Acidification	3,3E-3	1,9E-3	1,2E-3	2,3E-4	kg éq. SO ₂
Eutrophisation	9,9E-4	8,7E-4	8,4E-5	4,3E-5	kg éq. N
Formation de smog	5,7E-2	2,7E-2	2,7E-2	2,9E-3	kg éq. O ₃
Appauvrissement de la couche d'ozone	4,0E-8	3,6E-8	3,3E-9	1,0E-9	kg éq. CFC-11
Épuisement des ressources abiotiques	2,5E+0	2,0E+0	3,8E-1	1,0E-1	MJ

*Les impacts des deux modules de transport (A2 - Transport des matières premières et A4 - Transport au détaillant) sont présentés de façon agrégée, puisque ces transports sont réalisés simultanément au moyen d'une collecte et d'une livraison optimisée (voir section 2.2).

5. ANALYSE DE CONTRIBUTION

L'analyse de contribution permet d'identifier les principaux modules et sous-modules (activités) contribuant aux impacts de la collecte, du rechapage et de la livraison de pneus génie civil (Figure 6). Cette section vise à répondre à l'objectif spécifique 2. Il est à préciser que le module A4 - Transport au détaillant est réputé pour être compris dans le sous-module A2.1- Transport des pneus (voir section 0).

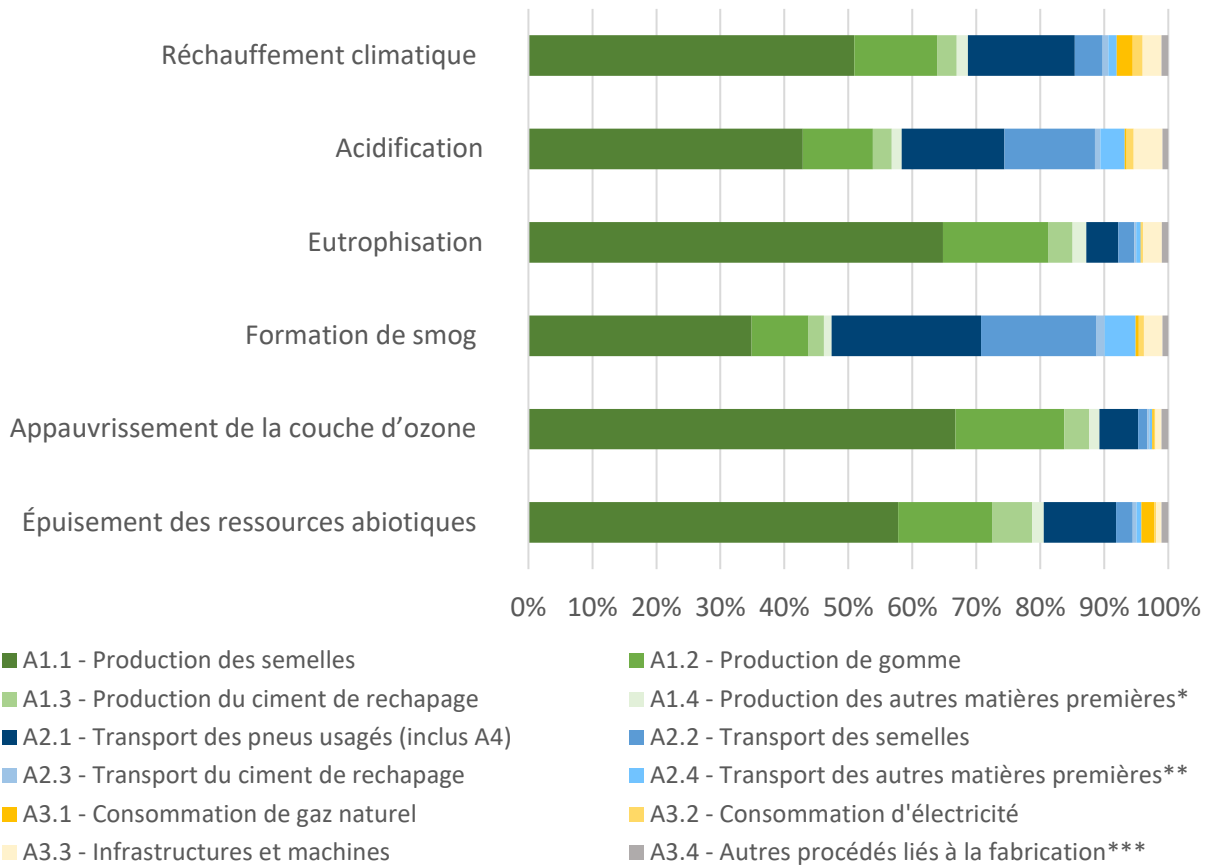


Figure 6 : Analyse de contribution

*Le sous-module A1.4 - Production des autres matières premières comprend la production des épaulés de caoutchouc, des emplâtres, du lubrifiant et de la peinture au latex noire.

**Le sous-module A2.4 - Transport des autres matières premières correspond au transport de la gomme de liaison, du ciment de rechapage, des épaulés de caoutchouc, des emplâtres, de la peinture au latex noire ainsi que du lubrifiant.

***Le sous-module A3.3 - Autres procédés liés à la fabrication comprend l’approvisionnement en matériaux auxiliaires, le transport de la semelle râpée ainsi que la gestion des déchets.

Au niveau de la contribution des modules (A1, A2+A4, A3) aux scores d’impacts totaux, il ressort que les impacts pour toutes les différentes catégories, à l’exception de *Formation de smog*, sont dominés par le module A1 - Production des matières premières (en vert) qui représente entre 58 et 89 % des impacts totaux. Le module A2 - Transport des matières premières (en bleu), qui inclut A4 - Transport au détaillant, domine quant à lui les impacts de la catégorie *Formation de smog*, avec 48 % des impacts. Ces deux modules représentent ensemble plus de 90 % des impacts totaux dans toutes les catégories.

En ce qui concerne les sous-modules (activités), le sous-module A1.1 - Production de semelles représente le plus grand contributeur avec 35 à 67 % des impacts totaux. Cela s’explique par le

fait que les semelles représentent la plus grande part de la masse des matières premières (68 % de la masse des matières premières vierges). Il est à rappeler que les pneus usagés, étant des matières secondaires, ne se voient pas attribuer d'impacts dans le présent système outre ceux liés à leur transport jusqu'à l'usine de LanOTR (voir section 1.2.5).

Pour les catégories d'impacts *Réchauffement climatique*, *Acidification* et *Formation de smog*, le sous-module A2.1 - Transport des pneus (qui inclut A4 - Transport au détaillant) est le deuxième contributeur le plus important, représentant 16 à 23 % des impacts totaux. Quant aux catégories d'impacts *Eutrophisation*, *Appauvrissement de la couche d'ozone* et *Épuisement des ressources abiotiques*, il s'agit du sous-module A1.2 - Production de la gomme de liaison qui constitue le deuxième plus grand contributeur (15 à 17 % des impacts totaux).

Le module A3 - Rechapage à l'usine, engendre peu d'impacts, soit moins de 8 % des impacts totaux pour les six catégories d'impacts.

6. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET RÉDUCTION DES IMPACTS DU RECHAPAGE PAR LANOTR

Afin de répondre à l'objectif spécifique 3 portant sur l'évaluation de la sensibilité des paramètres clés de l'ACV et l'exploration de voies pour réduire les impacts du rechapage réalisé par LanOTR, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les paramètres suivants :

- 1) **Type de caoutchouc (synthétique vs naturel).** La production de semelles de pneus représente une part importante des impacts du rechapage (35 à 67 % selon les catégories). Une hypothèse de base de l'étude est que l'ensemble des semelles utilisées par LanOTR sont fabriquées à partir de caoutchouc synthétique. Considérant que la production de caoutchouc synthétique a un impact plus important que la production de caoutchouc 100 % naturel et que LanOTR pourrait exiger de ces fournisseurs qu'ils s'approvisionnent en caoutchouc 100 % naturel, un changement du type de caoutchouc pour un caoutchouc 100 % naturel a été modélisé.
- 2) **Approvisionnement en matières premières (conventionnel vs écoresponsable).** La production des matières premières est le premier contributeur pour la majorité des catégories d'impacts et représentent donc un levier de réduction des impacts important. Il n'existe pas à ce jour de fournisseurs prêts à divulguer l'impact environnemental de leurs matières premières au moyen d'une ACV, d'une empreinte carbone ou d'une DEP. Malgré cette non-disponibilité d'informations quant à l'impact environnemental de ces achats, il pourrait être intéressant pour LanOTR d'en faire la demande, voire de l'exiger. En effet, de telles évaluations environnementales pourraient non seulement encourager les fabricants de matières premières à diminuer l'impact environnemental de leur

processus de fabrication, mais permettrait aussi à leurs clients, comme LanOTR, de choisir leurs fournisseurs en se basant sur la performance environnementale de leur produit. De plus, ceci permettrait d'améliorer la qualité des données utilisées pour l'ACV, puisque celles-ci augmenteraient la représentativité des données par rapport à des données puisées dans la base de données Ecoinvent. Pour simuler cet approvisionnement écoresponsable via la demande d'informations environnementales portant sur les matières premières et considérant que cette demande pourrait entraîner un certain niveau de compétition entre les fournisseurs permettant de réduire leur impact environnemental, un scénario prévoyant une baisse de 20 % de l'impact environnemental de l'ensemble des matières premières a été modélisé.

- 3) **Type de camion pour la collecte et la livraison des pneus.** Après les matières premières, le deuxième pôle d'impacts est celui du transport pour la collecte des pneus usagés et la livraison des pneus rechapés, qui représente entre 8 et 48 % des impacts selon les catégories. Les deux paramètres clés qui déterminent les impacts du transport sont les distances parcourues et le type d'énergie utilisée pour faire fonctionner le camion. Étant donné qu'il est difficile pour LanOTR d'exercer une influence sur les distances de transport parcourues étant donné que l'optimisation actuelle des déplacements, une simulation avec un camion à propulsion hybride diesel et électrique (qui est considérée comme consommant deux fois moins de carburant que le scénario de base utilisé dans l'ACV) a été réalisée pour observer les économies d'impacts qui seraient encourues advenant ce choix de camion par LanOTR. Ce scénario hypothétique est basé sur certaines références [14,15], mais n'a pas fait l'objet d'une analyse de faisabilité technico-économique spécifique à la situation de LanOTR.

Les résultats des analyses de sensibilité sont présentés au Tableau 9. Par souci de simplicité, seul l'écart d'impact entre le scénario étudié et le scénario initial retenu pour l'ACV pour la catégorie *Réchauffement climatique* a été pris en compte. Les valeurs en gras montrent les scores d'impacts des modules qui ont été affectés par le scénario étudié par rapport au scénario initial.

Tableau 9 : Analyse de sensibilité

Scénario évalué		RÉCHAUFFEMENT CLAMATIQUE				
		TOTAL (kg éq. CO ₂)	Écart avec le scénario initial	A1	A2	A3
-	Scénario initial	0,80	-	0,55	0,19	0,06
1	Approvisionnement à base de caoutchouc 100 % naturel	0,40	- 50,3 %	0,15	0,19	0,06
2	-20 % des impacts des matières premières	0,69	- 13,7 %	0,44	0,19	0,06
3	Camion hybride (collecte et livraison des pneus)	0,73	- 9,6 %	0,55	0,11	0,06

D'après cette analyse, on peut conclure qu'un approvisionnement de semelles à base de caoutchouc naturel entraîne une baisse conséquente de l'impact sur le *Réchauffement climatique* du rechapage (50,3 %) et représente donc un levier important à explorer. Les deux autres scénarios évalués engendrent respectivement des baisses de 13,7 et 9,6 % des scores GES, indiquant qu'elles sont également des avenues intéressantes pour réduire les impacts des activités de rechapage de LanOTR.

7. ÉTALONNAGE (BENCHMARKING)

Afin de réaliser l'étalonnage (benchmarking) des impacts du service de rechapage de LanOTR par rapport à ceux liés à la production de pneus neufs, une revue de littérature a été réalisée pour recenser le maximum d'études évaluant les impacts associés à la production de pneus neufs. Étant donné que les choix méthodologiques concernant les frontières du système, les méthodes d'allocation, la qualité des données et les bases de données de l'inventaire du cycle de vie utilisées sont différents, il est recommandé de faire preuve de précaution lors de la comparaison des résultats de ces études. Cette section poursuit l'objectif spécifique 4.

Les études présentées comprennent des publications scientifiques (Buadit 2023 [16], Sun 2016 [17]), une DEP réalisée par un fabricant de pneus (Michelin 2021 [18]) et un guide publié par une association de fabricants de pneus (JATMA 2021 [19]). Les résultats de ces études ont été compilés et intégrés à la Figure 7. Même si la revue de littérature a permis d'obtenir onze résultats d'ACV en totalité, seuls six ont été conservés pour cette section. En effet, certaines études présentaient des résultats anormalement élevés par rapport à la moyenne (facteur 10) et ont donc été jugées moins fiables. L'ensemble des résultats issus de la revue de littérature sont présentés à l'annexe 1. Étant donné le peu de données disponibles concernant

les catégories d'impacts autres que celles relatives au réchauffement climatique (score GES - kg éq. CO₂), seuls les résultats de cette catégorie sont présentés. De plus, étant donné l'absence d'études spécifiques aux pneus génie civil, il est à noter que les résultats de la revue présentés correspondent à des pneus de bus/camion ou des pneus d'automobiles. Ces résultats sont jugés suffisamment représentatifs pour la comparaison, puisque ceux-ci ont été ramenés à 1 kg de pneu produit, et que même si le type d'utilisation n'est pas le même, les méthodes de fabrication demeurent semblables.

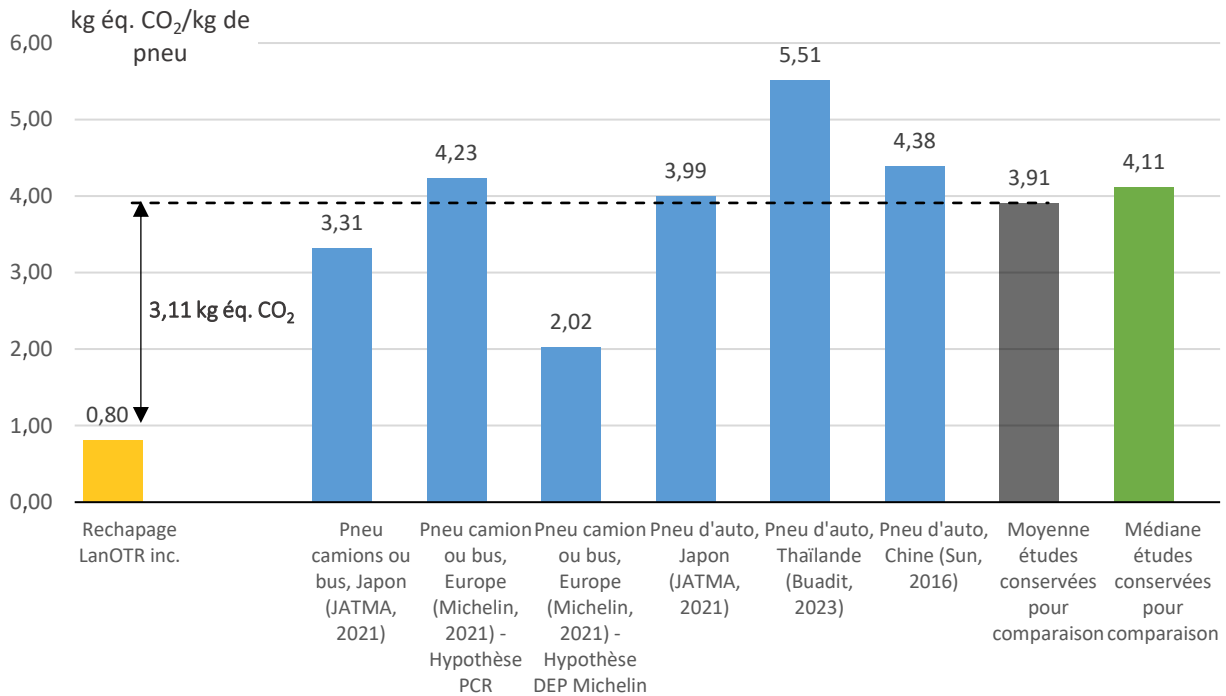


Figure 7 : Étalonage (benchmarking) - Émissions de GES (kg éq. CO₂) pour 1 kg de pneu neuf selon des ACV issues de la littérature vs émissions de GES du rechapage par LanOTR¹

Si l'on s'appuie sur une moyenne des résultats extraits des différentes études (barre en gris), il ressort que 3,11 kg éq. CO₂ sont économisés pour 1 kg de pneu rechapé par LanOTR par rapport à la production de 1 kg de pneu neuf. Il est à souligner que ces économies de GES reposent sur plusieurs hypothèses et que les émissions de GES pour la production de pneus neufs sont issues d'études comportant des champs d'étude très différents de la présente ACV, ce qui affecte la qualité de la comparaison. Ceci est sans compter l'influence sur les résultats de l'exclusion de l'étape d'utilisation des pneus. Au final, il est hautement recommandé que toute communication entourant ces économies de GES fasse mention qu'elles ont été calculées à l'aide des meilleures données disponibles, mais que celles-ci présentent des incertitudes élevées et reposent sur des hypothèses à confirmer.

8. LIMITES ET PISTES D'AMÉLIORATION

La présente ACV est basée sur un maximum de données primaires qui représentent spécifiquement le service de rechapage de LanOTR et des meilleures données secondaires disponibles. Malgré cela, l'ACV possède certaines limites qu'il convient d'énoncer afin de nuancer les conclusions obtenues. L'identification de ces limites permet également de formuler des pistes d'amélioration advenant une mise à jour future de l'ACV.

- **Composition des semelles.** La composition exacte des semelles utilisées par LanOTR n'est pas connue. D'après les fournisseurs, celles-ci pourraient être composées autant de caoutchouc synthétique que de caoutchouc naturel. Pour la présente ACV, une approche conservatrice a été utilisée, c'est-à-dire que le caoutchouc synthétique, celui qui engendre le plus d'impacts, a été retenu. Cependant, dans la réalité, il est fort probable que la part de caoutchouc synthétique soit plus faible que 100 %, ce qui pourrait avoir une influence certaine sur les résultats, puisque la contribution aux impacts des semelles est élevée. Pour les prochaines ACV, il est recommandé de demander, voire d'exiger autant que possible, la composition exacte des semelles aux différents fournisseurs afin d'augmenter la précision des résultats de l'étude.
- **ACV du berceau à la porte du client.** Les frontières de la présente ACV incluent les étapes de production et de transport des matières premières, le rechapage des pneus et la livraison des pneus rechapés aux détaillants. Ainsi, les étapes d'utilisation et de fin de vie du pneu ont été exclues. Dans le cadre de la présente comparaison des impacts d'un pneu rechapé avec ceux d'un pneu neuf, cette exclusion se justifie sur la base que les pneus rechapés et les pneus neufs possèdent les mêmes propriétés de roulement, comme l'a fait cette étude [5]. Toutefois, cette hypothèse clé formulée dès le début de la présente étude aurait intérêt à être réévaluée au fur à mesure que de nouvelles études seraient publiées sur la question. En effet, comme la phase d'utilisation domine les impacts sur le cycle de vie d'un pneu (92,6 %, pour un pneu de voiture) [20], et qu'une autre étude arrive à la conclusion qu'un pneu de voiture rechapé possède des propriétés de résistance au roulement réduites par rapport à un pneu neuf [21], ce qui est confirmé par une employée de Michelin [6], il apparaît opportun de reconnaître que les conclusions sur les gains environnementaux du rechapage par rapport à la production d'un pneu neuf, pour le cas des pneus génie civil, pourraient être plus nuancées si l'ensemble du cycle de vie était considéré.
- **Vulcanisation.** Certains des composants utilisés par LanOTR dans son procédé de rechapage sont faits à partir de caoutchouc non vulcanisé. Comme nos recherches n'ont pas permis de distinguer les impacts de la vulcanisation du reste des impacts de la production de caoutchouc, tous les composants à base de caoutchouc non vulcanisé ont été modélisés comme du caoutchouc vulcanisé. Ainsi, l'impact des intrants de caoutchouc

non vulcanisés utilisés par l'entreprise est considéré comme légèrement surestimé. Pour dépasser cette limite, une revue de littérature plus approfondie serait nécessaire ou encore une divulgation des impacts environnementaux des composants en caoutchouc non vulcanisé (au moyen d'une ACV ou d'une DEP) serait attendue.

- **Pneu génie civil moyen.** L'objet d'étude de cette ACV est le pneu génie civil rechapé moyen par LanOTR. Ainsi, les conclusions ne sont applicables qu'à un pneu de ce type et aucune extrapolation ou généralisation à d'autres types de pneus ne devrait être réalisée. De plus, il est à rappeler que la présente ACV ne concerne pas les activités de réparation de pneus génie civil réalisées par LanOTR.

9. CONCLUSION

Les quatre objectifs spécifiques de cette ACV sont : 1) évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie de la collecte, du rechapage et de la livraison de pneus génie civil réalisés par LanOTR; 2) identifier les principaux contributeurs aux différents scores d'impacts; 3) réaliser une analyse de sensibilité des paramètres clés de l'ACV et une exploration de voies de réduction des impacts pour LanOTR; et 4) réaliser l'étalonnage (benchmarking) des impacts environnementaux du rechapage réalisé par LanOTR avec ceux liés à la fabrication de pneus neufs et spécifier les limites de cette comparaison.

L'unité déclarée a été définie comme suit : « Réaliser la collecte, le rechapage et la livraison de 1 kg de pneu génie civil moyen. » Les données primaires sont représentatives de l'année 2022. Les données secondaires ont été puisées dans la base de données Ecoinvent v3.9.1 [9] pour modéliser les processus inconnus et non contrôlés par LanOTR (p. ex. fabrication des matières premières). Six catégories d'impacts de la méthode d'évaluation des impacts TRACI 2.1 ont été retenues.

Les principaux résultats de l'ACV sont :

- Le score d'impacts pour le *Réchauffement climatique* est de 0,80 kg éq. CO₂ par kg de pneu génie civil rechapé;
- Les impacts environnementaux des catégories *Réchauffement climatique*, *Acidification*, *Eutrophisation*, *Formation de smog*, *Appauvrissement de la couche d'ozone* et *Épuisement des ressources abiotiques* sont dominés par le module A1 - Production des matières premières (58 à 89 % des impacts totaux);
- Les impacts environnementaux de la catégorie *Formation de smog* sont dominés par le module A2 - Transport des pneus (incluant A4) (48 % des impacts totaux);
- Pour toutes les catégories d'impacts, le sous-module A1.1 - Production de semelles représente un contributeur majeur (35 à 67 % des impacts totaux);

- Pour les catégories d'impacts *Réchauffement climatique*, *Acidification* et *Formation de smog*, le module A2 - Transport des pneus (incluant A4) est le deuxième contributeur le plus important (16 à 23 % des impacts totaux). Pour les catégories *Eutrophisation*, *Appauvrissement de la couche d'ozone* et *Épuisement des ressources abiotiques*, le sous-module A1.2 - Production de la gomme de liaison constitue le deuxième plus grand contributeur (15 à 17 % des impacts totaux);
- Le module A3 - Rechapage à l'usine entraîne peu d'impacts (moins de 8 % des impacts totaux pour l'ensemble des catégories);
- L'analyse de sensibilité a permis de montrer que des changements dans l'approvisionnement en matières premières et l'utilisation de camions hybrides pour la collecte et la livraison des pneus pouvaient entraîner des réductions significatives des impacts relatifs au *Réchauffement climatique* (9,6 à 50,3 % de réduction);
- Sur la base de six études sélectionnées parmi 11 études recensées dans la littérature scientifique et la littérature grise (documents officiels), il ressort que les émissions de GES moyennes pour la production de 1 kg de pneu neuf pour automobile, bus ou camion sont estimées à 3,91 kg éq. CO₂;
- Sur la base des émissions de GES pour le rechapage calculées dans la présente ACV (0,80 kg éq. CO₂ par kg de pneu rechapé) et la moyenne calculée pour la production de pneus neufs (3,91 kg éq. CO₂ par kg de pneu neuf), les économies de GES pour chaque kg de pneu rechapé sont estimés à 3,11 kg éq. CO₂.

Cette ACV a permis d'atteindre les quatre objectifs spécifiques visés. De plus, les limites et pistes d'amélioration de l'étude ont été présentés afin de mieux interpréter les résultats obtenus et d'améliorer la qualité de l'étude lors d'une éventuelle mise à jour de l'ACV. Nous espérons que cette ACV permettra à LanOTR de mieux comprendre les bénéfices environnementaux de son service de rechapage par rapport à la production d'un pneu neuf et lui permettra de les communiquer avec nuance et transparence à ses différentes parties prenantes.

10. RÉFÉRENCES

- [1] Organisation internationale de normalisation (2006) ISO 14040:2006 Management environnemental - analyse du cycle de vie - principes et cadre.
- [2] Organisation internationale de normalisation (2006) ISO 14044:2006 Management environnemental - analyse du cycle de vie - exigences et lignes directrices.
- [3] Syndicat national du caoutchouc et des polymères et Syndicat des professionnels du pneu (2019) Tous les procédés de rechapage ont les mêmes avantages ? - Rechapage à froid. Disponible à : <https://www.rechapage.fr/index.php/fr/decouvrir-le-rechapage/tous-les-procedes-de-rechapage-ont-les-memes-avantages>.
- [4] ISO (2017) *ISO 21930:2017 - Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services*.
- [5] Fraunhofer Institut (2022) Ökologische bewertung runderneuerung. Disponible à : https://azur--netzwerk-de.translate.goog/pressemitteilung/fraunhofer-institut-zieht-positive-oekobilanz-qualitativ-hochwertig-runderneuerter-reifen-versus-vergleichbarer-neureifen/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr.
- [6] MICHELIN (2023) Communication personnelle avec une employée impliquée dans les projets d'ACV chez Michelin en France.
- [7] Comité européen de normalisation (2013) EN 15804:2012+A1:2013. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction.
- [8] Organisation internationale de normalisation (2017) ISO 21930:2017 Développement durable dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil - règles principales pour les déclarations environnementales des produits de construction et des services.
- [9] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. and Weidema, B. (2016) The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 1218-1230. Disponible à : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1087-8>.
- [10] UL Environment (2017) Product Category Rules : Tires.
- [11] U.S. environmental protection agency Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI) TRACI version 2.1 - User's guide. Disponible à : <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf>.
- [12] UL Environment (2022) Product category rules for building-related products and services. Part A:Life cycle assessment calculation rules and report requirements. Standard UL 10010. Version 4.0. Disponible à : https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=ULE10010_6_S_2022_0328.
- [13] GreenDelta (2023) OpenLCA 2.02. Disponible à : <https://www.openlca.org/>.
- [14] Les compagnies Loblaw Limitée (2023) Le premier camion lourd entièrement électrique

- de Loblaw arrive dans le grand Montréal. Disponible à : <https://www.loblaw.ca/fr/loblaw-rolls-out-first-battery-electric-transport-truck-a-major-milestone-toward-its-goal-of-a-carbon-neutral-fleet/>.
- [15] Roy, G. (2023) Un moteur électrique qui transforme les camions. Disponible à : <https://unpointcinq.ca/sinspirer/un-moteur-electrique-qui-transforme-les-camions/>.
- [16] Buadit, T., Ussawarujikulchai, A. and Suchiva, K. (2023) Environmental impact of passenger car tire supply chain in Thailand using the life cycle assessment method. Disponible à : <https://www.x-mol.net/paper/article/1631139521465323520>.
- [17] Sun, X., Liu, J. and Hong, J. (2016) Life cycle assessment of Chinese radial passenger vehicle tire. Disponible à : https://www.researchgate.net/publication/303743756_Life_cycle_assessment_of_Chinese_radial_passenger_vehicle_tire.
- [18] Michelin (2021) DEP Michelin X Incity EV Z 27570 R22.5 152149J ILCD. Disponible à : <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/46121264-0da8-4ccd-563d-08d9a98a0c6e/Data>.
- [19] Japan Automobile Tyre Manufacturers Association (2021) Tyre LCCO2 Calculation Guidelines ver 3.0.1. Disponible à : https://www.jatma.or.jp/english/tyrerecycling/pdf/lcco2guideline_en2104.pdf.
- [20] Michelin (2023) Les performances environnement. Disponible à : <https://toutsurlepneu.michelin.com/les-performances-environnement>.
- [21] European Tyre and Rim Technical Organisation (2019) Impact of casing and retreading process on retreaded tyres labelled performances. Disponible à : <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/11/etrto-research-on-casing-and-process-impact-on-retreaded-tyres-labelled-performances-does-for-publication.pdf>.
- [22] Nexen Tire (2023) DEP N'fera AU7 225/55R/18. Disponible à : <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/c7306c1e-0ccd-4e3e-fe64-08db18957e6c/Data>.
- [23] Nexen Tire (2023) DEP N'fera Sport 225/55 R18 102Y XL. Disponible à : <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/515c8504-1c75-451e-fe67-08db18957e6c/Data>.
- [24] Nexen Tire (2023) DEP N'fera Sport AS 285/45R21. Disponible à : <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/02f080bd-ca3e-44f9-fe6a-08db18957e6c/Data>.
- [25] Piotrowska, K., Kruszelnicka, W. and Bałdowska-Witos, P. (2019) Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method. Disponible à : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6947500/>.
- [26] Center for Remanufacturing and Reuse (2008) A report comparing the carbon footprint of a new and a retread tyre use by light road commercial vehicles. Disponible à : <https://fr.scribd.com/document/563316357/1p158#>.

ANNEXE 1 : ÉMISSIONS DE GES POUR LA FABRICATION DE PNEUS NEUFS - TOTALITÉ DES ÉTUDES RECENSÉES

Parmi les onze résultats d'ACV provenant de la littérature, six ont été retenus sur la base de leur niveau de pertinence pour être comparés à la production d'un pneu rechapé par LanOTR (section 7). En effet, les résultats d'ACV anormalement élevés par rapport à la moyenne (facteur 10) n'ont pas été exploités à la section 7. Pour des raisons informatives et par mesure de transparence, les résultats de l'ensemble des études de la revue de littérature sont présentés au Tableau 10 sur la prochaine page. Étant donné le peu de données disponibles concernant les catégories d'impacts autres que ceux relatifs au *Réchauffement climatique* (émissions de GES ou score GES en kg éq. CO₂), seuls les résultats de cette catégorie sont présentés. Pour certaines études, la décomposition en modules (A1 à A3) n'étant pas disponible, seul le score total est présenté. Étant donné que les choix méthodologiques concernant les frontières du système, les méthodes d'allocation, la qualité des données et les bases de données de l'inventaire du cycle de vie utilisées sont différents, il est recommandé de faire preuve de précaution lors de la comparaison des résultats de ces études.

Tableau 10 : Scores GES (kg éq. CO₂) pour 1 kg de pneu neuf produit provenant d'ACV du berceau à la porte issues de la littérature et comparaison avec le score GES de la présente étude

Nom de l'étude*	Masse du pneu (kg)	Score GES (kg éq. CO ₂ /kg de pneu)			
		A1	A2	A3	Total
Rechapage pneu génie civil, Canada (LanOTR inc., 2023)	317,7	0,55	0,19	0,06	0,80
Pneu camion et bus neuf, Japon (JATMA, 2021) [19]	56,2	2,44	0,17	0,70	3,31
Pneu camion et bus neuf, Europe (Michelin, 2021) - Hypothèse PCR [18] ³	56,8	3,32	0,39	0,52	4,23
Pneu camion et bus neuf, Europe (Michelin, 2021) - Hypothèse DEP Michelin [18] ³	56,8	1,59	0,19	0,25	2,02
Pneu d'auto neuf, Corée (Nexen, 2023) - Tire N'fera AU7 [22] ³	10,32	32,18	0,33	2,84	35,35
Pneu d'auto neuf, Europe (Nexen, 2023) - Tire N'fera Sport [23] ³	10,32	32,90	0,82	6,52	40,23
Pneu d'auto neuf, Europe (Nexen, 2023) - Tire N'fera Sport AS [24] ³	15,95	49,53	1,18	6,18	56,88
Pneu d'auto neuf, Japon (JATMA, 2021) [19]	8,6	3,05	0,13	0,80	3,99
Pneu d'auto neuf, Thaïlande (Buadit, 2023) [16]	10,0	-	-	-	5,51
Pneu d'auto neuf, Pologne (Piotrowska, 2019) [25]	10,0	-	-	-	33,37
Pneu d'auto neuf, Chine (Sun, 2016) [14]	9,50	-	-	-	4,38
Moyenne de toutes les études de la revue	-	-	-	-	18,93
Médiane de toutes les études de la revue	-	-	-	-	4,95
Moyenne des études conservées pour la comparaison	-	-	-	-	3,91
Médiane des études conservées pour la comparaison	-	-	-	-	4,11

*Les noms d'étude en blanc sont présentés à la section 7, alors que celles dont le nom est en noir n'y figurent pas.

³ Les scores GES des pneus Michelin ont été obtenus sur la base de deux hypothèses de durées de vie illustrées ici. Pour la première, une durée de vie indicative de 230 000 km présente dans PCR a été utilisée. [10] Pour la deuxième, une durée de vie de 110 000 km a été utilisée. Il s'agit d'une hypothèse plus conservatrice et basée sur des tests effectués par Michelin. Ce chiffre a été obtenu à partir de la DEP correspondant au pneu étudié, en effectuant une moyenne des estimations de durée de vie pour les pneus utilisés en mode « Drive » (hypothèse conservatrice) [18]. Pour les scores GES des pneus Nexen, la DEP fournit un coefficient (resp. 0,025; 0,033 et 0,02) permettant de connaître la fraction de pneu à considérer pour satisfaire l'unité fonctionnelle (« Un pneu utilisé pendant 1000 km »).

ANNEXE 2 : COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE GES ET CO₂ POUR LE RECHAPAGE

Deux études présentant les émissions de GES ou de CO₂ liées au rechapage de pneus ont été recensées (Tableau 11). La première étude portait sur le rechapage de pneu de camion au Japon et a exprimé les résultats en émissions de GES [19] et la deuxième étude a focalisé sur le rechapage de pneus de véhicules commerciaux au Royaume-Unis et a généré les résultats en CO₂ (exclu les autres gaz à effet de serre, comme le méthane et l'oxyde nitreux [26]). Les émissions divisées par module du cycle de vie sont également fournies.

Tableau 11 : Comparaison des émissions de GES (kg éq. CO₂) et des émissions CO₂ pour 1 kg de pneus rechapés avec ceux calculés dans la présente étude

Étude japonaise vs présente étude	Masse pneu (kg)	Score GES (kg éq. CO ₂ /kg de pneu)			
		A1	A2	A3	Total
Rechapage pneu camion, Japon (JATMA, 2021) [19]	56,2	0,72	0,06	0,38	1,15
Rechapage pneu génie civil, Canada (LanOTR inc., 2023)	317,7	0,55	0,19	0,06	0,80

Étude anglaise vs présente étude	Masse pneu (kg)	Score CO ₂ (kg CO ₂ /kg de pneu) (ne prend pas en compte les autres GES)			
		A1	A2	A3	Total
Rechapage pneu véhicule commercial, Royaume-Unis (Centre for Remanufacturing and Reuse, 2008) [26]	26,5	0,38	0,12	0,34	0,83
Rechapage pneu génie civil, Canada (LanOTR inc., 2023)	317,7	0,55	0,17	0,06	0,78

Cette comparaison montre que les résultats de la présente étude sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans les autres études et permet, par conséquent, d'avoir un niveau de confiance relativement élevé envers les résultats obtenus.

Rapport final
ANALYSE DU CYCLE DE VIE
DU RECHAPAGE DE PNEUS
GÉNIE CIVIL RÉALISÉ PAR
LANOTR



CT CONSULTANT
Expertise en analyse environnementale du cycle de vie

WWW.CTCONSULTANT.CA
CHARLES@CTCONSULTANT.CA

514.647.9125