

Titre: Utilisation des données d'une plateforme de traçabilité blockchain pour l'amélioration des ACV
Title: pour l'amélioration des ACV

Auteur: Vincent Carrières
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Carrières, V. (2021). Utilisation des données d'une plateforme de traçabilité blockchain pour l'amélioration des ACV [Master's thesis, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/9478/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9478/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Robert Pellerin, Andrée-Anne Lemieux, & Manuele Margni
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Utilisation des données d'une plateforme de traçabilité blockchain pour
l'amélioration des ACV**

VINCENT CARRIÈRES

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Octobre 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Utilisation des données d'une plateforme de traçabilité blockchain pour l'amélioration des ACV

présenté par **Vincent CARRIÈRES**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Christophe DANJOU, président

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Andrée-Anne LEMIEUX, membre et codirectrice de recherche

Manuele MARGNI, membre et codirecteur de recherche

Guillaume MAJEAU-BETTEZ, membre

REMERCIEMENTS

La rédaction de ce mémoire a été possible grâce à un grand nombre de personnes qui ont su m'apporter leur soutien et leur confiance tout au long de ces deux années d'études.

Je souhaite d'abord remercier mes directeurs de recherche, Robert Pellerin, Andrée-Anne Lemieux et Manuele Margni pour leur encadrement académique sans faille et leur disponibilité depuis le début de ma maîtrise. Tout n'a pas été simple pendant ces deux années mais vous avez toujours su garder un optimisme et une motivation communicatifs. Chacun dans vos domaines d'expertises, vous m'avez apporté de précieux conseils qui m'ont permis d'aboutir à ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à Sylvain Cariou pour la confiance qu'il a su m'accorder dès mon arrivée chez Crystalchain ainsi que pour sa bienveillance constante et sa disponibilité. Je n'oublie bien sûr pas tous mes collègues chez Crystalchain qui ont su consacrer du temps pour me former et qui ont permis de rendre cette expérience de travail à la fois agréable et passionnante.

Je remercie affectueusement mes parents, mes sœurs Charlotte et Margaux et toute ma famille proche : votre soutien, votre affection et votre énergie quotidienne m'ont été précieux. J'ai une pensée particulière pour Clara, qui a été pendant ces deux années la meilleure copine qu'on puisse rêver d'avoir et qui m'a soutenu dans mon parcours au Canada malgré la distance qui nous séparait. Je te remercie pour tout le bonheur que tu m'apportes depuis plus de 2 ans maintenant.

Un merci spécial à mes coloc et mes amis de Montréal avec lesquels nous avons partagé tant de bons moments. Vous avez rendu cette expérience au Canada toute particulière. Je pense aussi à mes amis proches en France que je remercie pour leur soutien à distance et pour les bons moments passés à mon retour à Paris.

Enfin, je souhaite remercier Joséphine pour ses conseils de recherche et pour nos échanges qui m'ont permis d'améliorer ce travail.

RÉSUMÉ

L'urgence environnementale à laquelle l'humanité est confrontée, avec des enjeux critiques comme le réchauffement climatique ou la perte de biodiversité, doit être considérée avec la plus grande attention par les acteurs industriels faisant face au durcissement des réglementations environnementales et à l'exigence accrue des consommateurs concernant la durabilité des produits qu'ils achètent. Pour mesurer et communiquer sur l'impact environnemental de leurs produits, les entreprises industrielles ont ainsi recours à la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet d'évaluer l'impact des produits sur l'ensemble de leur chaîne de valeur. Cette méthodologie est cependant fortement dépendante de la spécificité des données qu'elle prend en compte pour fournir un résultat d'impact fiable et représentatif. La difficulté de la collecte des données de production auprès des différentes acteurs d'une chaîne de valeur constitue ainsi sa principale limite. En même temps, la technologie blockchain s'est récemment développée de manière spectaculaire pour des applications de traçabilité de produits et d'enregistrement de données industrielles grâce à ses propriétés d'immutabilité, d'intégrité, et de persistance des données qui garantissent la transparence et la confiance entre acteurs industriels.

Ce mémoire s'intéresse donc aux opportunités des systèmes de traçabilité blockchain pour améliorer les ACV de produits industriels. Peu d'articles font pour le moment le lien entre ACV et traçabilité blockchain et se contentent de proposer un cadre d'intégration et une architecture générale sans détailler les processus d'affaires d'implantation et les acteurs concernés. Une méthodologie d'implantation de systèmes ACV-blockchain en 8 processus d'affaires principaux a ainsi été développée et évoque les activités, les acteurs, les jalons et les livrables nécessaires à la réalisation d'un tel projet. Une expérimentation a ensuite été menée sur des lots de laine peignée pour évaluer l'intérêt de cette méthodologie. Deux résultats principaux ont été obtenus : l'impact environnemental des lots de laine peut varier drastiquement en fonction de leur composition et de la provenance des laines (jusqu'à +118% sur l'impact global entre deux lots de compositions différentes) et les données spécifiques apportées par la traçabilité changent fortement la perception de l'impact des lots par rapport à des données génériques pour une composition de laine fixée (+36% d'impact calculé sur l'étape de transformation avec les données spécifiques). Ces résultats justifient l'utilisation de la traçabilité blockchain pour affiner le calcul d'impact environnemental par ACV au niveau des lots de produits. Les limites de ces résultats et les perspectives de recherche futures sont ensuite présentées pour venir compléter l'outil méthodologique développé.

ABSTRACT

The environmental emergency that humanity is facing, with critical issues such as global warming or the loss of biodiversity, must be considered with the greatest attention by industrial companies facing at the same time the toughening of environmental regulations and increased expectations from consumers about the sustainability of the products they buy. To measure and communicate about the environmental impact of their products, industrial companies mostly use the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which makes it possible to assess the impact of products on their entire value chain. However, this methodology is highly dependent on the specificity of the data it takes into account to provide a reliable and representative impact result. The difficulty of collecting production data from different stakeholders in a value chain is thus its main limitation. At the same time, the applications of blockchain technology for product traceability and industrial data registration have recently boomed thanks to its immutability, its integrity, and the persistence of data on the network that guarantee transparency and trust between stakeholders.

This research paper focuses on the opportunities of blockchain traceability systems to improve the LCA of industrial products. For the moment, few articles link LCA and blockchain traceability and those who do simply propose an integration framework and a general architecture without detailing the business processes and the stakeholders concerned in an implementation project. A methodology for implementing blockchain-LCA systems divided in 8 main business processes has thus been developed and evokes the activities, stakeholders, milestones and deliverables needed to carry out such a project. An experiment was then conducted on wool top lots to assess the contribution of this methodology. Two main results were obtained: the environmental impact of the wool top lots can vary drastically depending on their composition and the origin of the wool (up to +118% on the overall environmental impact between two batches of different compositions) and the specific data provided by traceability strongly changes the perception of the impact of wool top lots compared to generic data for a fixed wool composition (+36% of calculated impact on the processing step with specific data). These results justify the use of blockchain traceability to refine the LCA calculation of environmental impact at the level of product batches. The limitations of these results and future research perspectives are then presented to complement the methodological tool developed in this paper.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Introduction	4
2.2 Stratégie de recherche de la revue de littérature	4
2.3 Présentation des concepts.....	7
2.3.1 Développement durable des industries manufacturières	7
2.3.2 Méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie	8
2.3.3 Technologie blockchain	9
2.3.4 Plateformes de traçabilité	11
2.4 Défis des chaînes d'approvisionnement durables et des méthodes de calcul d'impact .	13
2.4.1 Défis des chaînes d'approvisionnement durables	13
2.4.2 Défis des méthodes de calcul d'impact	14
2.5 Opportunités de la blockchain pour les chaînes d'approvisionnement durables	15
2.5.1 Opportunités générales	15
2.5.2 Opportunités pour l'amélioration des Analyses du Cycle de Vie	18

2.6	Modèles d'intégration ACV-blockchain	19
2.6.1	Cadre d'intégration et architecture d'un système ACV-blockchain	19
2.6.2	Concept d'un système ACV-blockchain dans le secteur de l'aéronautique.....	23
2.6.3	Limites des articles ACV-blockchain et apports de ce mémoire	25
2.7	Limites et barrières d'adoption de ces modèles	27
2.8	Enseignements et perspectives	28
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		30
3.1	Définition des objectifs de recherche	30
3.2	Méthodologie de recherche	31
CHAPITRE 4 OBSERVATIONS DU TERRAIN ET PRÉSENTATION DES ACTEURS DU PROJET.....		33
4.1	Confirmation des objectifs de recherche avec l'expérience terrain	33
4.2	Présentation du partenaire industriel de recherche : Crystalchain	34
4.3	Présentation du partenaire industriel d'expérimentation : Chargeurs	36
CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'IMPLANTATION D'UN SYSTÈME ACV-BLOCKCHAIN.....		38
5.1	Prérequis.....	38
5.2	Acteurs du projet	39
5.3	Objectifs de la méthodologie d'intégration.....	41
5.4	Choix du formalisme de modélisation	42
5.5	Processus de niveau 1	43
5.6	Sous-processus de niveau 2.....	45
5.6.1	Processus de planification et lancement de projet.....	45
5.6.2	Processus de modélisation des processus d'affaires	46
5.6.3	Processus de cadrage de l'ACV et réalisation d'une étude générique	48

5.6.4	Processus d'identification et de collecte des données de production.....	50
5.6.5	Processus de réalisation d'une ACV statique d'évaluation.....	53
5.6.6	Processus d'extension du modèle de données de traçabilité	56
5.6.7	Processus d'interfaçage de la plateforme blockchain avec le logiciel ACV	58
5.6.8	Processus de calcul dynamique des chaînes de traçabilité	60
CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION		62
6.1	Définition des objectifs et du périmètre du projet pilote.....	62
6.1.1	Objectifs du projet et limites	62
6.1.2	Périmètre et organisation des activités	63
6.2	Étude ACV de la laine peignée produite par Chargeurs	65
6.2.1	Cadrage de l'étude ACV et première étude générique.....	65
6.2.2	Identification des données clés de production et collecte des données.....	72
6.2.3	Réalisation de l'étude ACV d'évaluation.....	74
6.3	Résultats de l'expérimentation	76
6.3.1	Comparaison de scénarii sur la composition des lots et les processus optionnels	77
6.3.2	Apports des données spécifiques par rapport à une ACV générique	86
6.3.3	Enseignements et apports des données de traçabilité pour le calcul ACV.....	89
6.3.4	Limites de l'étude et incertitudes des résultats obtenus	91
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		93
RÉFÉRENCES.....		96
ANNEXES.....		101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Mots-clés de recherche	5
Tableau 2.2 : Articles proposant des modèles ACV-blockchain	7
Tableau 4.1 : Convergence des observations du terrain et de la revue de littérature	33
Tableau 5.1 : Rôles des partenaires d'affaires d'un projet ACV-blockchain	39
Tableau 5.2 : Exemples de lots de produits pour la modélisation ACV	59
Tableau 6.1 : Choix des catégories d'impact et des méthodes de caractérisation pour l'étude ACV	67
Tableau 6.2 : Contribution des catégories d'impact recommandées au score unique obtenu par ReCiPe endpoint 2016 (H, A).	70
Tableau 6.3 : Sources principales d'impact pour chacune des principales catégories identifiées ..	71
Tableau 6.4 : Processus élémentaires créés pour l'étude ACV	74
Tableau 6.5 : Présentation des différents scénarii pour l'analyse ACV selon la composition des lots de laine	78
Tableau 6.6 : Contribution relative des catégories d'impact au score unique pour le scénario 1 ...	78
Tableau C.1 : Liste de données à collecter pour l'ACV et disponibilité sur la plateforme blockchain	103
Tableau D.1 : Liste des processus utilisés pour le modèle ACV depuis Ecoinvent et Agribalyse	105

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Positionnement de la requête par rapport aux concepts.....	5
Figure 2.2 : Fonctionnement de la plateforme de traçabilité de Crystalchain (Crystalchain, 2020)	11
Figure 2.3 : Cadre d'intégration d'un système ACV-blockchain (adapté de Zhang et al., 2020) ..	19
Figure 2.4 : Architecture d'un système ACV-blockchain (adapté de Zhang et al., 2020).....	21
Figure 2.5 : Concept d'un système de gestion de données basé sur la blockchain pour l'ACV (adapté de Rollinck et al., 2021)	24
Figure 3.1 : Méthodologie suivie pour répondre aux sous-objectifs de recherche	31
Figure 4.1 : Exemple d'utilisation de la plateforme Crystalchain pour une filière textile (Crystalchain, 2020)	35
Figure 5.1 : Éléments de modélisation BPMN.....	42
Figure 5.2 : Processus de niveau 1 de la méthodologie d'intégration	44
Figure 5.3 : Processus 2.1, planification et lancement de projet.....	45
Figure 5.4 : Processus 2.2, modélisation des processus d'affaires.....	46
Figure 5.5 : Processus 2.3, cadrage de l'ACV et réalisation d'une étude générique.....	48
Figure 5.6 : Processus 2.4, identification et collecte des données clés de production	50
Figure 5.7 : Processus 2.5 : réalisation d'une ACV statique d'évaluation	53
Figure 5.8 : Processus 2.6, extension du modèle de données de traçabilité	56
Figure 5.9 : Processus 2.7, interfaçage plateforme blockchain-logiciel ACV	58
Figure 5.10 : Processus 2.8, calcul dynamique des chaînes de traçabilité	61
Figure 6.1 : Présentation de la chaîne de valeur générale d'un produit en laine	63
Figure 6.2 : Modélisation des processus de transformation de la laine par Chargeurs en Chine avant filature	64
Figure 6.3 : Classification des fermes en 3 catégories pour l'étude ACV	73

Figure 6.4 : Modélisation ACV de la laine peignée CLM	75
Figure 6.5 : Analyse de contribution au changement climatique par étape du cycle de vie pour les 5 scénarii	80
Figure 6.6 : Analyse de contribution par étape du cycle de vie pour le scénario 5.....	81
Figure 6.7 : Analyse de contribution relative à 100% des différents scénarii modélisés pour chaque catégorie d'impact.....	82
Figure 6.8 : Taux de variation d'impact par catégorie pour des scénarii extrêmes	83
Figure 6.9 : Analyse comparative à 100% des scores uniques des 5 scénarii	84
Figure 6.10 : Matrice des scores uniques normés à 100% en fonction de la composition des lots en laine des fermes 1 et 2	85
Figure 6.11 : Analyse de contribution comparative entre les ACV générique et spécifique	87
Figure 6.12 : Analyse de contribution comparative entre les ACV générique et spécifique pour la phase de transformation de la laine	88
Figure 6.13 : Taux de variation d'impact par catégorie de l'ACV spécifique par rapport à l'ACV générique	89
Figure A.1 : Structure méthodologique de ReCiPe 2016 (adapté de Huijbregts et al., 2016)	101
Figure B.1 : Diagramme simplifié des processus d'affaires de CLM	102
Figure B.2 : Système de produit ACV d'un lot de laine peignée en sortie d'usine de peignage ..	102

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV Analyse du Cycle de Vie

APMS Advances in Production Management Systems

BC Blockchain

BPA Business Process Analysis

CIRAIg Centre International de Référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services

CLM Chargeurs Luxury Materials

DQR Data Quality Ratio

EICV Evaluation de l'Impact du Cycle de Vie

EQ Ecosystem Quality

FAO Food and Agriculture Organization

GES Gaz à Effet de Serre

HH Human Health

ICV Inventaire du Cycle de Vie

IoT Internet of Things

IWTO International Wool Textile Organisation

JRC Joint Research Centre

LEAP Livestock Environmental Assessment and Performance

PoC Proof of Concept

R Resources

RFID Radio Frequency Identification

RSE Responsabilité Sociétale des Entreprises

SI Système d'Information

SSC Sustainable Supply Chain

UF Unité Fonctionnelle

UNECE United Nations Economic Commission for Europe

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Structure de la méthodologie de caractérisation ReCiPe 2016	101
Annexe B Diagramme des processus d'affaires et système de produit ACV	102
Annexe C Tableau de collecte de données d'inventaire pour l'ACV	103
Annexe D Liste des processus utilisés pour le modèle ACV depuis Ecoinvent et Agribalyse....	105

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'importance du développement durable des industries manufacturières est un sujet relativement récent. Il a véritablement pris de l'ampleur à la suite de la Conférence sur l'Environnement et le Développement des Nations Unies en 1992, qui conclut que la production non-durable de produits industriels est l'une des sources principales de dommages sur l'environnement (UN Conference on Environment and Development, 1992). Il est progressivement devenu primordial pour tout acteur industriel d'être capable de comprendre, de mesurer et de piloter l'impact qu'ont ses activités sur l'environnement. Cette urgence est particulièrement applicable au secteur industriel de la mode et du textile, qui est confronté à une véritable révolution de l'éthique écologique. Entre la prise de conscience environnementale croissante des consommateurs (2 Français sur 3 estiment que le développement durable des marques de mode est un critère de choix important pour leurs achats) et l'évolution rapide des réglementations, qui visent à rendre un affichage environnemental des produits textiles obligatoire à moyen terme, il devient indispensable pour tout acteur du secteur d'évaluer et de communiquer sur sa performance environnementale. Le Fashion Pact, le Global Compact, les Objectifs de Développement Durable de l'ONU, la Charte de l'Industrie de la Mode pour l'Action Climatique... sont autant d'engagements incontournables récemment pris par les plus grandes entreprises de mode pour réduire l'impact qu'elles ont sur l'environnement et rompre avec le modèle de Fast Fashion.

Pour mesurer l'impact environnemental de leurs produits, depuis l'extraction des matières premières qui les composent jusqu'à leur fin de vie, ces entreprises peuvent compter sur la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie, standardisée par les normes ISO à la fin des années 90 et devenue une référence des méthodes d'évaluation d'impact à partir des années 2000 (Guinée et al., 2011). Cette méthodologie permet d'identifier les points chauds environnementaux d'une chaîne de valeur et ainsi de déterminer les stratégies de gestion de production et d'éco-conception de produits à mettre en place (Hauschild et al., 2005).

Bien que la mesure d'impact environnemental par ACV constitue la pierre angulaire de la stratégie de production durable des industries, de nombreux obstacles viennent compliquer sa réalisation, particulièrement dans le secteur de la mode où les chaînes de valeur sont particulièrement mondialisées, fragmentées et d'une complexité croissante. Ces aspects rendent la collecte de données environnementales fiables auprès des différents acteurs de transformation d'un produit

textile particulièrement complexe. En effet, une mesure d'impact environnemental complète d'un produit fini ne sera représentative et aboutie qu'à condition de disposer de données fiables, spécifiques, actualisées et transparentes. Cette collecte de données représente en moyenne 80% du temps et des ressources allouées à un projet ACV (Teh et al., 2020) et peut ainsi décourager de nombreux acteurs. De plus, la variabilité temporelle de l'impact environnemental d'un produit peut être suffisamment importante pour justifier la collecte fréquente de nouvelles données (Lueddeckens et al., 2020).

Ces difficultés de manque de transparence des données et de perte de confiance entre acteurs d'une chaîne de valeur ont été déterminantes dans la décision de nombreuses entreprises d'établir un système de traçabilité, pour garantir la qualité et la sécurité de leurs produits. Le développement récent des nouvelles technologies de l'industrie 4.0 telles que le RFID, l'IoT ou le cloud computing a permis une automatisation de la collecte de données et la technologie blockchain s'est imposée comme le facilitateur principal des systèmes de traçabilité digitalisés (Bougdira et al., 2019). Depuis 2017, l'intérêt pour les plateformes de traçabilité blockchain ne cesse de croître grâce à l'enregistrement et la sécurisation de données de manière décentralisée qu'elles permettent. Elles se présentent ainsi comme une solution à de nombreuses difficultés rencontrées lors de la réalisation d'ACV.

Ce projet de recherche vient donc se situer à la jonction des concepts d'ACV et de traçabilité blockchain, dont l'utilité semble être complémentaire pour assurer la production durable des acteurs industriels. Le financement et l'hébergement du projet par l'entreprise Crystalchain, leader en solutions de traçabilité blockchain, sera un apport important dans la mise en pratique de ces deux concepts sur le terrain industriel.

On peut alors déterminer plusieurs objectifs de ce projet. Premièrement, il permettra de faire un état des lieux sur les opportunités de la traçabilité blockchain pour réaliser un calcul d'impact environnemental. Ensuite, il permettra de justifier la nécessité et l'apport d'un système d'ACV dynamique basé sur la blockchain et apportera une méthodologie détaillée pour l'implémentation de ce système. Enfin, il proposera une expérimentation de cette méthodologie sur une filière textile de laine haut de gamme.

Pour répondre à ces objectifs, une revue de littérature mêlant les concepts d'ACV et de traçabilité blockchain sera menée, dégageant les principaux modèles d'intégration proposés. Une

méthodologie de réalisation d'ACV dynamique basée sur la blockchain sera ensuite proposée pour associer un impact environnemental à chaque lot de production d'un produit en laine. Les limitations inhérentes au système et à la méthodologie proposée ainsi que les futures améliorations souhaitables seront alors explicitées. Enfin, une expérimentation de la méthodologie sera menée, avec une analyse de variabilité de l'impact environnemental en fonction de la provenance et des processus de transformation d'un produit en laine à partir de données industrielles réelles ainsi qu'une comparaison de l'apport de données de production génériques et spécifiques. Cela permettra de justifier l'apport d'un système ACV-blockchain.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps de présenter les quatre concepts clés du projet de recherche : le développement durable des industries, la méthodologie ACV, la technologie blockchain et les plateformes de traçabilité. Par la suite, les défis actuels auxquels sont soumis les chaînes d'approvisionnement durables et les méthodes d'évaluation d'impact seront présentés. En explorant les bénéfices inhérents à la technologie blockchain et son apport pour la traçabilité, des opportunités seront ainsi soulevées pour assurer la durabilité des chaînes d'approvisionnement. Cela permettra plus précisément de détailler les modèles d'intégration entre méthodes de calcul d'impact et plateformes de traçabilité blockchain proposés dans la littérature, qui correspondent au cœur de ce sujet de recherche. La mise en perspective de leurs limites et éventuelles barrières d'adoption sera alors nécessaire.

2.2 Stratégie de recherche de la revue de littérature

Afin de déterminer l'état de la connaissance scientifique sur la traçabilité blockchain et l'ACV, et surtout sur les liens qui ont pu être faits entre ces deux concepts dans la littérature, une revue de littérature systématique a été menée dans la base de données Scopus. Cette revue a été également l'occasion plus généralement de faire le lien entre la traçabilité blockchain et l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit, au-delà de la simple méthodologie ACV.

Pour mener cette revue de littérature, trois concepts clés au projet de recherche ont été identifiés :

- La blockchain, qui est la technologie qui nous intéresse pour créer le registre des transactions sur la chaîne de valeur d'un produit industriel
- La traçabilité, qui est l'application de la technologie blockchain qui nous intéresse dans le cadre de ce projet. On recherche donc uniquement les articles qui traitent de cette application particulière de la technologie blockchain.
- Les méthodes d'évaluation du développement durable, ou « sustainability » en anglais, qui sont le champ d'application de la traçabilité blockchain. On inclut volontairement dans cette revue l'ensemble des méthodes d'évaluation du développement durable d'une

organisation ou d'un produit et pas uniquement l'ACV. Cela nous permet de détecter d'éventuels modèles qui pourraient être applicables pour intégrer l'ACV et la traçabilité blockchain, qui reste le sujet principal de cette recherche.

Afin de pouvoir mener la recherche dans Scopus, des mots clés ont été identifiés pour chacun de ces 3 concepts. Ils sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.1 : Mots-clés de recherche

Blockchain	Traceability	Sustainability methods
blockchain OR BC	traceability OR trace OR tracking OR trackability OR traced	sustainab* OR lca OR "life cycle assessment" OR carbon footprint OR ghg OR footprint* OR "environmental impact"

La requête suivante a alors été construite pour la recherche dans Scopus :

Requête 1: ABS (blockchain OR BC) AND ABS (traceability OR trace OR tracking OR trackability OR traced) AND ABS (sustainab OR lca OR "life cycle assessment" OR "carbon footprint" OR ghg OR footprint* OR "environmental impact").*

Les mots-clés ont été uniquement recherchés dans les résumés des articles afin que les concepts soient centraux dans les articles rencontrés. Cette requête a mené à 94 articles trouvés.

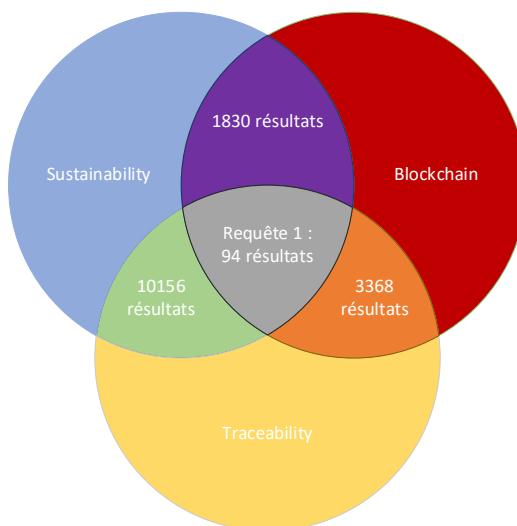


Figure 2.1 : Positionnement de la requête par rapport aux concepts

La figure ci-dessus nous montre que les sujets de traçabilité environnementale ont déjà été largement traités dans la littérature scientifique (plus de 10 000 résultats sur Scopus), de même que les applications de la technologie blockchain pour la traçabilité (plus de 3000 résultats). L'utilisation de la technologie blockchain en général pour le développement durable des entreprises commence également à être bien explorée.

Cependant, les papiers qui traitent de la traçabilité blockchain et de son application pour le développement durable (requête 1) sont beaucoup moins nombreux (94 résultats sur Scopus). Un premier tri de ces articles a alors été effectué. Les sujets trop éloignés du domaine de recherche ont alors été exclus (domaines en lien avec la santé, les arts, les sciences sociales et les sciences de la terre). De plus, seuls les articles en anglais ont été conservés. Enfin, seuls les articles, les papiers de conférence et les revues de conférence ont été conservés, ramenant le nombre total d'articles à 53. Après lecture des résumés d'articles, certains articles n'ont pas été étudiés notamment en raison du nombre important d'articles traitant de sujets similaires sur les bénéfices de la traçabilité blockchain sur les filières agroalimentaires et qui ne traitaient pas d'ACV. Il était intéressant d'en lire un certain nombre pour comprendre comment la traçabilité blockchain est une réponse viable aux exigences durables d'une chaîne de valeur sans pour autant être exhaustif, car notre foyer de recherche reste celui de l'ACV en particulier. Après lecture des résumés, 32 articles ont été traités dans la revue de littérature.

À la suite d'une première lecture, il a été noté que la quasi-totalité de ces 32 articles était purement conceptuelle, dissertant notamment des opportunités et bénéfices de la traçabilité blockchain pour la durabilité des chaînes d'approvisionnement ou de ses limites. Ces articles seront ainsi discutés dans les parties 2.3 à 2.5 de cette revue de littérature, qui introduisent l'intérêt de la blockchain pour le calcul d'impact environnemental, ainsi que dans la partie 2.7, qui met en avant les limites potentielles d'un système ACV-blockchain.

La partie 2.6 de cette revue de littérature est la plus importante, car elle détaille les méthodologies d'intégration ACV-blockchain qui ont été proposées dans la littérature. Pour délimiter plus précisément les articles qui développent des méthodologies d'intégration ACV-blockchain ou proposent des modèles d'implémentation, une nouvelle requête a été effectuée sur Scopus :

Requête 2: ABS (method OR implement* OR concept*) AND ABS (blockchain) AND ABS (lca OR "life-cycle assessment").*

Par rapport à la requête 1, on rajoute ainsi le concept clé de méthodologie, on restreint le concept des méthodes de durabilité à la simple ACV et on enlève le concept de traçabilité qui est trop filtrant. La requête 2 renvoie alors 6 résultats. Un de ces résultats concerne l'ACV du bitcoin et ne correspond pas au sujet de recherche, il est donc exclu. Un autre article (Farooque et al., 2020) traite bien de l'ACV-blockchain, mais seulement de ses limites sans proposer de modèle d'intégration. Il sera donc traité en partie 2.7. Un troisième article (Teh et al., 2020) évoque l'opportunité de l'ACV-blockchain sans en proposer un modèle d'intégration. Il sera traité en partie 2.5.2. Enfin, un quatrième article (Shojaei et al., 2019) aborde les opportunités de la blockchain pour assurer la durabilité des constructions sans proposer de modèle.

Il reste donc uniquement 2 articles centraux pour le projet de recherche qui proposent des modèles d'intégration de systèmes ACV-blockchain. Ils seront traités dans la partie 2.6 et sont les suivants :

Tableau 2.2 : Articles proposant des modèles ACV-blockchain

1	Rolinck, M., Gellrich, S., Bode, C., Mennenga, M., Cerdas, F., Friedrichs, J., & Herrmann, C. (2021). A concept for blockchain-based LCA and its application in the context of aircraft MRO. Paper presented at the <i>Procedia CIRP</i> , 98 394-399.
2	Zhang, A., Zhong, R. Y., Farooque, M., Kang, K., & Venkatesh, V. G. (2020). Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 152

2.3 Présentation des concepts

2.3.1 Développement durable des industries manufacturières

Dans sa définition la plus générale, le développement durable peut être défini comme un ensemble d'idées et de stratégies mises en place dans le but de préserver l'équilibre fonctionnel du système naturel et de « répond(re) aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland, 1987). Il est donc fondé sur 3 piliers principaux : environnemental, social et économique. Dans la suite de ce mémoire, nous nous concentrerons uniquement sur les actions menées pour répondre à l'aspect environnemental du développement durable.

Pour les entreprises manufacturières, la production durable et la gestion durable des Supply Chains sont les deux chantiers principaux dans leur quête de durabilité environnementale. D'abord, la production durable consiste à fournir des produits ou des services en utilisant des processus et des systèmes peu polluants, conservateurs des ressources naturelles, peu consommateurs en énergie et viables économiquement (Veleva et al., 2001). Ensuite, la gestion durable de la Supply Chain vise à assurer en amont un approvisionnement responsable des matières premières tout en favorisant en aval la recyclabilité, la durabilité et le réemploi des produits finis (Svensson, 2007). Cette gestion vise à établir une Supply Chain durable, ou Sustainable Supply Chain (SSC). Ces chantiers sont définis par la stratégie RSE de l'entreprise et intègrent une démarche d'écoconception des produits. Ils nécessitent alors une connaissance accrue par l'entreprise de l'impact environnemental de ses activités et de celles de ses fournisseurs et donc une démarche d'ingénierie du cycle de vie (Hauschild et al., 2005). Des outils de mesure et de pilotage de la performance environnementale sont ainsi nécessaires (Zhang et al., 2020).

2.3.2 Méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) définit l'ACV comme une « Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO, 2006). Cette méthodologie, standardisée par la série de normes ISO 14040 et ISO 14044, est actuellement largement utilisée par les industries manufacturières pour mesurer l'impact de leurs produits ‘du berceau au tombeau’ (Farooque et al., 2020). Son avantage principal est l'approche holistique qu'elle permet en traitant de toutes les phases de vie du produit, de l'extraction des matières premières à son traitement en fin de vie.

Conformément à la norme ISO 14044, la méthodologie ACV peut être découpée en quatre phases :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude : c'est lors de cette étape que sont notamment définies les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle (UF) envisagée et la méthodologie de calcul qui sera utilisée par la suite;
- Analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV) : c'est l'étape de collecte et de calcul des données d'intrants et d'extrants du système de produit défini auprès des différents acteurs de la chaîne de valeur du produit;

- Évaluation de l'impact (ACVI) : il s'agit de l'étape de calcul de l'impact environnemental de l'ensemble des flux de l'inventaire grâce à des facteurs de caractérisation. Ces derniers sont des coefficients issus de modèles scientifiques établis qui convertissent les flux élémentaires de l'ICV en une quantification de leur impact sur un indicateur environnemental; et
- Interprétation des résultats : cette étape permet d'identifier à partir des résultats précédents les enjeux environnementaux principaux et d'en tirer des conclusions et des recommandations générales.

Les résultats d'une étude ACV peuvent alors être utilisés par les entreprises pour localiser les sources de contribution principales d'un produit à différentes catégories d'impact environnemental. Cela favorise la prise de décisions en interne concernant la planification de production, l'organisation de la chaîne logistique (Bojarski et al., 2009), les choix d'écoconception des produits (matière, géométrie...) et la stratégie environnementale globale à mettre en place (Hauschild et al., 2005). Ces études peuvent également être à usage marketing, afin de communiquer au consommateur final l'impact environnemental du produit qu'il achète, ce qui peut parfois constituer un facteur différentiant convaincant à l'achat (Zhang et al., 2020).

2.3.3 Technologie blockchain

La blockchain a initialement été conceptualisée par Satoshi Nakamoto en 2009 dans son article « Bitcoin : a Peer-to-Peer Electronic Cash System ». À l'origine, la blockchain est décrite comme « un réseau en peer-to-peer capable d'effectuer des paiements en ligne d'un individu à l'autre sans intervention d'une institution financière » (Nakamoto, 2009). Son application initiale pour le bitcoin et les cryptomonnaies s'est depuis largement diversifiée grâce à ses nombreuses qualités, notamment pour la traçabilité de produits.

Il s'agit d'un registre distribué et partagé composé d'une série de blocs de données liés selon une chaîne et qui utilisent des méthodes cryptographiques (Lim et al., 2021). Ce registre agit comme une base de données décentralisée qui enregistre de manière immutable et sécurisée chaque transaction exécutée sur le réseau (Saberi et al., 2018). Des copies multiples du registre sont partagées à chaque utilisateur du réseau, chaque nœud de connexion possédant ainsi une copie

complète de toute la blockchain depuis sa création, mise à jour en temps réel (Köhler et Pizzol, 2020). La blockchain repose sur trois innovations clés :

- La cryptographie, afin de garantir l'intégrité sur le réseau. Chaque bloc de données inclut au moins les données des transactions du bloc, un hash, un horodatage et le hash du bloc n-1. Les hash sont des signatures cryptographiques représentatives du contenu du bloc (Lim et al., 2021). Ils sont obtenus en appliquant des algorithmes à sens de chiffrement unique. Toute modification infime du contenu du bloc entraîne ainsi une modification conséquente de son hash. La présence du hash du bloc n-1 dans le bloc n (et donc par transitivité dans son propre hash) entraîne ainsi l'impossibilité d'altérer les données, sans quoi il y aurait une rupture visible du lien cryptographique avec les blocs en amont (Agrawal et al., 2021);
- Les algorithmes de consensus, afin d'établir la confiance sur le réseau et de s'assurer que les transactions ont lieu de manière fiable (Feng et al., 2021). Le plus connu est le PoW (Proof of Work). Dans ce cadre, un groupe de mineurs déploie une forte puissance de calcul pour résoudre un problème mathématique aléatoire dont la solution est nécessaire pour la validation du bloc. Lorsque la solution est trouvée, chaque nœud du réseau doit la tester, au regard de l'état actuel de sa copie du réseau, et l'approuver à majorité pour valider la transaction. Dans la plupart des plateformes de traçabilité blockchain, un algorithme PoA (Proof of Authority) beaucoup plus simple et moins énergivore est utilisé. Les transactions sont alors simplement validées par des validateurs du réseau, qui sont des utilisateurs approuvés; et
- Les Smart Contracts, qui définissent des règles pour le traitement des transactions sans avoir besoin d'un intermédiaire tripartite (Lim et al., 2021).

Le principal avantage de cette technologie disruptive est l'impossibilité théorique d'altérer les données de transaction enregistrées dans la BC à cause des multiples versions conservées par les différents utilisateurs. Elle a des propriétés telles que l'immutabilité, l'intégrité, la persistance des données (Wang et al., 2020) et l'anonymat pour certaines BC. La décentralisation du réseau BC permet également un accès plus facile aux données de la part de tous les utilisateurs du réseau et d'établir la confiance entre des acteurs habituellement méfiant l'un envers l'autre (Mukherjee et al., 2021).

2.3.4 Plateformes de traçabilité

La traçabilité est définie comme « la possibilité de tracer l'histoire, l'application et la localisation d'une entité grâce à des identifications enregistrées » à toutes les étapes de sa chaîne de valeur (ISO 9001, 2015). La complexité des chaînes d'approvisionnement dans de nombreux secteurs industriels, et particulièrement celui de la mode et du luxe, entraîne une opacité du parcours amont des produits et justifie le recours à une traçabilité accrue depuis son origine. La gestion des chaînes d'approvisionnement durables repose d'ailleurs fondamentalement sur une traçabilité convaincante à toutes les étapes (Agrawal et al., 2021). Que ce soit pour des considérations de qualité (Arena et al., 2019), d'authenticité, de sécurité alimentaire (Zhao et al., 2019), d'origine du produit ou de maîtrise des enjeux RSE (Agrawal et al, 2021), les nouvelles technologies de l'industrie 4.0 ont permis une formidable amélioration du suivi des produits tout au long de leur fabrication et de leur distribution. On peut notamment citer la technologie RFID, qui permet une identification par radiofréquences au niveau des lots de production (Kelepouris et al., 2007) grâce à une puce électronique intégrée aux produits à tracer.

Mais c'est surtout la technologie blockchain qui a permis la mise en place de plateformes de traçabilité digitales intégrées. En effet, les avantages inhérents à la blockchain tels que l'auditabilité, l'immutabilité et la transparence sont des atouts majeurs pour garantir la traçabilité de produits industriels le long de chaînes de valeurs complexes et parfois fragmentées (Karamachoski et al., 2020).

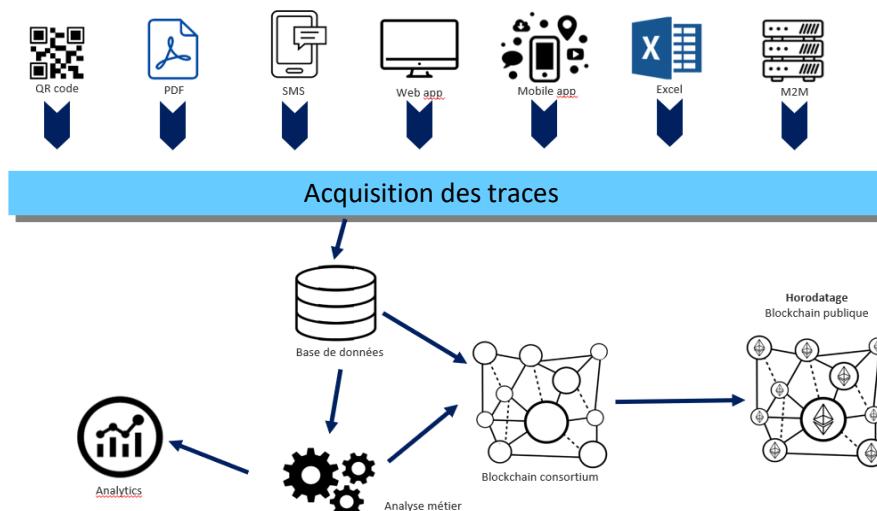


Figure 2.2 : Fonctionnement de la plateforme de traçabilité de Crystalchain (Crystalchain, 2020)

Un exemple de fonctionnement d'une plateforme de traçabilité blockchain est celui de la plateforme de Crystalchain, qui fournit des solutions de traçabilité aux entreprises industrielles (figure précédente). Les différents acteurs d'une filière de transformation ont tous un accès par un compte distinct à une application (web app ou mobile app) dans laquelle ils peuvent soumettre des « traces » de production. Ces traces correspondent à des transactions ou événements qui ont lieu pendant la fabrication du produit. Elles peuvent être acquises à partir de différentes sources : fichiers PDF, fichiers Excel, SMS de confirmation de transaction, ERP ou autres SI d'entreprise, ou directement renseignées manuellement sur la plateforme. Ces traces sont enregistrées dans une base de données centralisée. Elles peuvent alors être exploitées pour une analyse métier, c'est-à-dire alimenter un système d'analyse des données (création de tableaux de bord, construction graphique de chaînes de traçabilité). Les informations relatives aux traces sont également enregistrées et hashées sur une blockchain privée dite de « consortium », où Crystalchain et le client sont définis comme administrateurs et les autres acteurs comme utilisateurs. Il est défini dans cette blockchain privée une hiérarchie des priviléges afin que les acteurs d'une chaîne de valeur ne puissent avoir accès qu'aux informations de leurs fournisseurs et non de leurs concurrents ou de leurs clients respectifs. Enfin, un hash reprenant les hashs des blocs successifs de la blockchain privée est également enregistré de manière périodique sur une blockchain publique, dans ce cas le réseau Ethereum, afin de renforcer l'intégrité de la donnée.

L'un des objectifs principaux de ces plateformes de traçabilité est de permettre un partage et une uniformisation des informations entre les différents acteurs d'une chaîne de valeur et ainsi de restaurer la confiance tout au long de cette chaîne grâce à la technologie. Elles ont également de nombreux autres avantages immédiatement exploitables par les entreprises qui souhaitent les mettre en place :

- Suivi des flux de production et gestion des stocks. Peut permettre une augmentation de l'efficacité opérationnelle (Hastig et al., 2020) et la réduction des déchets de production (Feng et al., 2020);
- Maîtrise de la qualité des produits et réduction considérable du temps d'identification des lots en cas de rappel (Zhao et al., 2019);
- Certification de l'origine et du parcours de produits, qui peuvent être des éléments à haute valeur ajoutée pour une marque (Karamachoski et al., 2020);

- Maîtrise de la performance RSE des sites de fabrication et des fournisseurs (Agrawal et al., 2021). Des tableaux de bord avec des indicateurs de performance environnementale peuvent par exemple faire partie des solutions de traçabilité proposées; et
- Communication au consommateur final de l'origine du produit qu'il achète et les spécificités de sa production (Alonso et al., 2020).

Tous ces avantages associés à la mise en place d'une plateforme de traçabilité blockchain expliquent le « buzz technologique » qui entoure cette technologie. La traçabilité blockchain suscite un intérêt croissant dans un nombre de secteurs toujours plus variés : l'agroalimentaire, la mode, l'industrie pharmaceutique (Hastig et al., 2020), le secteur minier... et le nombre de cas d'implantations réussies bondit également. Les plus grandes entreprises d'agroalimentaire, de mode et de luxe ont bien saisi ces bénéfices, à l'image de Walmart qui a investi 25M\$ depuis 2017 pour développer son propre système de traçabilité blockchain ou de LVMH qui a développé la plateforme de traçabilité blockchain Aura pour garantir l'authenticité de ses produits de luxe.

2.4 Défis des chaînes d'approvisionnement durables et des méthodes de calcul d'impact

2.4.1 Défis des chaînes d'approvisionnement durables

Malgré un contexte de développement durable pressant et de nombreuses contributions sur son application dans l'industrie manufacturière depuis les années 1990, il n'est toujours pas chose aisée pour les entreprises d'adopter une stratégie environnementale adéquate en raison de la méconnaissance qu'elles ont des activités extérieures à leur périmètre. L'impact de ces activités liées aux chaînes d'approvisionnement représente pourtant jusqu'à 90% de l'impact environnemental des entreprises de transformation de produits (Wang et al., 2020). Garantir une chaîne d'approvisionnement durable (SSC) est donc le principal levier de production durable. Le principal défi qui s'impose alors pour établir une SSC est la complexité croissante de chaînes de valeurs mondialisées et fractionnées (Venkatesh et al., 2020). Comment certifier qu'un produit est écoresponsable sans connaître les pratiques d'un fournisseur de rang 2, et sans même connaître le nom d'un fournisseur de rang 3? La dispersion géographique des chaînes de valeur entraîne ainsi leur vulnérabilité en rendant extrêmement complexes la traçabilité des produits, le suivi des

événements de production et la gestion des risques (Katsikouli et al., 2020). Cette complexité empêche donc en même temps la mesure et la gestion de l'impact environnemental aux différentes étapes de production (Wang et al., 2020).

Également, les activités d'une chaîne d'approvisionnement sont de nature dynamique et sont amenées à évoluer dans le temps. Pour assurer leur durabilité, il faudrait pouvoir disposer d'un système facilement adaptable qui permettrait une saisie fréquente et simultanée d'informations variées à travers différents continents (Park and Li, 2021). Il faudrait également être capable de pouvoir gérer les informations fragmentées qui parviennent des différents acteurs avec un système décentralisé qui ne serait pas sujet à une défaillance localisée (Saberi et al., 2018). Les principaux défis qui se posent actuellement à l'établissement d'une SSC sont donc la transparence, la responsabilité et la traçabilité.

2.4.2 Défis des méthodes de calcul d'impact

Les défis auxquels font face les chaînes d'approvisionnement affectent également nécessairement l'efficacité des méthodes de calcul d'impact environnemental, qui connaissent un écart important entre leur théorisation et leur application réelle (Zhang et al., 2020). C'est le cas pour l'évaluation de l'empreinte carbone, la vérification des inventaires de GES étant assez chronophage en raison d'une indisponibilité ou d'une fragmentation importante des informations nécessaires (Diniz et al., 2021). Cela est encore plus probant dans le cadre des ACV qui prennent en considération beaucoup plus de flux (ressources ou émissions) provenant de sources plus variées. De nombreuses entreprises considèrent donc la réalisation de projets ACV difficile, avec une estimation de 70 à 80% du temps et des ressources du projet alloués à la simple collecte de données (Teh et al., 2020). Pour bien comprendre en quoi la collecte de données fiables est fondamentale pour la représentativité des ACV, détaillons comment celles-ci sont exploitées.

Différents types de données sont utilisées pour réaliser une ACV. Certaines données, appelées données primaires, sont spécifiques à l'entreprise et issues de ses propres bases de données (SI d'entreprise, fichier Excel...). Elles sont un indicateur fiable des pratiques de l'entreprise, différenciantes et représentatives de son activité. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, ou pour des processus qui sortent du périmètre de l'étude (par exemple l'approvisionnement d'électricité d'une usine ou le transport des matières premières), on utilise des données dites secondaires issues de bases de données d'inventaire ACV (par exemple Ecoinvent) ou de rapports

d'experts. Elles sont génériques et représentent une vision moyenne d'une filière de transformation d'un produit, elles sont donc non-différenciantes. La représentativité de l'étude ACV est ainsi proportionnelle au taux de données spécifiques utilisées dans le périmètre de l'étude.

On voit donc aisément en quoi la difficulté de collecte de données, notamment durant la phase d'ICV, est problématique. De plus, l'ACV est une méthodologie dont les résultats ont une sensibilité importante et la qualité des données doit donc être mesurée et maximisée (Farooque et al., 2020).

Enfin, un sujet qui est couramment abordé concerne l'évolution temporelle de l'impact environnemental des activités industrielles, qui est difficilement conciliable avec la grande inertie des études ACV. Certaines études ont montré une variation temporelle significative de l'impact (Pigné et al., 2020) ce qui justifierait d'améliorer les ACV pour les rendre plus dynamiques. En allant plus loin, il serait intéressant de pouvoir réaliser rapidement des ACV sur des produits identiques d'une même marque avec des chaînes de valeur différentes ou des matières premières d'origines différentes.

2.5 Opportunités de la blockchain pour les chaînes d'approvisionnement durables

2.5.1 Opportunités générales

La traçabilité blockchain qui a été présentée au paragraphe 2.3.4 constitue une solution privilégiée aux difficultés évoquées au paragraphe précédent. Mahyuni et al. (2020) proposent une cartographie des potentiels de la blockchain pour améliorer la performance des chaînes d'approvisionnement en identifiant 4 thèmes principaux : la transparence, la confiance, la traçabilité et la durabilité. Sur les 52 articles analysés, 9 abordent exclusivement le thème de la durabilité. Cela confirme un intérêt certain de la littérature sur ce sujet, bien qu'encore minoritaire et à développer. Il faut là encore séparer les articles qui abordent la durabilité sociale et économique, qui ne sont pas inclus dans le cadre de ce projet, de ceux qui abordent la durabilité environnementale.

Pour évaluer de manière exhaustive les opportunités de la blockchain sur les SSC en particulier, Kouizadeh et Sirkis (2018) proposent une décomposition schématique intéressante des activités

reliées à une chaîne d'approvisionnement et de l'apport de la blockchain sur chacune de ces activités. Ils dégagent, à partir de ce schéma, 10 activités relatives aux SSC, ce qui constitue un cadre d'analyse exhaustif intéressant pour structurer ce paragraphe.

Tout d'abord, d'après la littérature, la traçabilité blockchain pourrait permettre une identification des fournisseurs les plus durables parmi l'ensemble des fournisseurs d'une entreprise déjà équipés d'une infrastructure de traçabilité blockchain, et ce basé sur des données certifiables et auditables et sur l'historique de leur performance RSE. La sélection de fournisseurs est en effet un processus très dépendant de la qualité de l'information fournie et les bases de données de durabilité disponibles actuellement manquent encore de données crédibles (Kouizadeh et Sirkis, 2018). Ainsi, il serait possible de faire de l'approvisionnement responsable afin d'éviter une surexploitation des ressources de la part des fournisseurs de matière première (Park et Li, 2021). Les fournisseurs pourraient aussi être certifiés pour une production éthique et durable (Saurabh et Dey, 2021). Également, une plateforme de traçabilité blockchain pourrait permettre de gérer le développement de ces fournisseurs, mesurer la performance environnementale d'un parc de fournisseurs et déterminer les fournisseurs potentiellement problématiques et les risques environnementaux associés à une chaîne d'approvisionnement. Toujours dans le cadre des approvisionnements responsables, une plateforme de traçabilité blockchain aurait pour intérêt d'être capable de tracer le parcours des produits en amont et de vérifier qu'ils n'ont pas d'impact majeur sur des enjeux environnementaux prioritaires tels que la biodiversité ou l'utilisation des ressources naturelles.

Une fois les fournisseurs sélectionnés, la gestion durable des réseaux logistiques d'approvisionnement pourrait être encore améliorée par la traçabilité blockchain. Elle pourrait notamment permettre de réduire les inspections d'audit et de conformité dans les entrepôts et de simplifier les procédures d'inventaire. Cela entraînerait donc une réduction des déchets dus à la perte de matériaux (Kouizadeh et Sirkis, 2018). La traçabilité carbone des étapes de transport, combinée à un système d'enregistrement électronique d'émissions des camions (Shakhsbulatov et al., 2019), constitue une autre amélioration notable pour la durabilité des étapes de transport.

La blockchain peut également être un apport conséquent pour réduire l'impact environnemental des opérations de production internes à l'entreprise. Elle peut notamment assister la procédure de certification environnementale de sites industriels multiples en accumulant, agrégant, et certifiant des documents dispersés sur différents sites industriels, facilitant ainsi les audits environnementaux

multisites (Kouizadeh et Sirkis, 2018). Elle peut également servir à mesurer et gérer la performance environnementale des activités directes d'un site industriel en mesurant les niveaux d'émissions et la consommation de ressources à partir de données spécifiques collectés sur ce site (Zhang et al., 2020). Les informations enregistrées sur la blockchain pourraient alors servir à alimenter différentes pratiques de la gestion durable de l'entreprise comme les systèmes de gestion environnementale, la comptabilité environnementale, l'écoconception, l'analyse du cycle de vie des produits, la gestion de production durable...

Plus globalement, les plateformes de traçabilité blockchain ont un potentiel exploitable pour l'amélioration de l'écoconception de produits et la réalisation d'ACV, point qui sera détaillé dans la partie suivante.

Pour continuer le long de la chaîne de valeur du produit, la traçabilité environnementale par blockchain peut permettre de faire du marketing sur les engagements durables d'une marque, lui apportant ainsi un élément différenciant important. Ainsi, une plateforme de traçabilité blockchain reliée à un système de restitution au consommateur permet à ce dernier de vérifier si son achat est responsable et durable (Kouhizadeh et al., 2021). Le système blockchain peut ainsi s'imposer comme un acteur tiers de confiance certifiant auprès du consommateur la durabilité environnementale du produit qu'il achète, apportant un niveau de preuve supplémentaire à la simple déclaration par la marque elle-même (Saberi et al., 2018). Plus qu'un élément de réduction de l'impact environnemental, la traçabilité environnementale par blockchain devient ainsi un moyen de vente et d'engagement du consommateur en balayant les fausses affirmations.

La réduction des déchets de production générés peut également se réaliser grâce au traçage et à au contrôle des produits non-conformes tout au long de leur production. La traçabilité blockchain permet ainsi de réduire le nombre de retouches ou de rappels de produits et donc d'éviter un surplus de déchets (Shoaib et al., 2020) ainsi que de contrôler le parcours et la fin de vie de produits chimiques dangereux, et donc d'éviter la dégradation de l'environnement (Mahyuni et al., 2020). La gestion des déchets et le commerce de déchets dans le cadre de l'économie circulaire, à l'image de ce qui se fait pour le commerce de crédits carbone, peuvent également se faire à l'aide de la blockchain et des Smart Contracts pour définir les termes des contrats (Kouizadeh et Sirkis, 2018). Plus largement, la traçabilité des matériaux en fin de vie permet d'accroître la confiance sur leur origine pour leur réutilisation et favorise ainsi la démarche d'économie circulaire basée sur 4

principes clés : la prolongation de la durée de vie, la réutilisation, le reconditionnement et le recyclage.

Enfin, la traçabilité blockchain peut assurer une gestion de l'énergie transversalement sur toute la chaîne d'approvisionnement et favoriser une chaîne d'approvisionnement bas carbone et à faible empreinte environnementale en traçant les émissions de gaz à effet de serre, les principaux polluants et les consommations d'eau par exemple (Park et Li, 2021). Elles ont donc le potentiel de cartographier les points chauds environnementaux d'une chaîne de valeur complète pour faciliter la réingénierie et structurer la stratégie environnementale complète d'une entreprise (Saberi et al., 2018). Une utilisation de la blockchain très fréquemment évoquée est celle du commerce des crédit carbone et du commerce de l'énergie pour effectuer les transactions à partir de Smart Contracts, qui définissent les termes de ces contrats d'échange. Dans le cadre de cette étude, cette opportunité ne sera cependant pas traitée.

2.5.2 Opportunités pour l'amélioration des Analyses du Cycle de Vie

L'application de la traçabilité blockchain qui est la plus en lien avec ce projet de recherche concerne l'amélioration des études ACV. En effet, les principaux défis pour les projets d'ACV sont la collecte d'informations fiables et transparentes ainsi que l'utilisation de données mises à jour, comme mentionné dans la partie 2.4.2. Une étude a ainsi été menée auprès de grandes compagnies australiennes du secteur des matériaux afin de les questionner sur l'apport que pourrait avoir la blockchain afin d'améliorer les méthodes d'ACV (Teh et al., 2020). La majorité des cadres dirigeants interrogés estime que cette technologie joue un rôle majeur pour surmonter la complexité des projets ACV, qui deviennent nécessaires dans l'évaluation de l'impact environnemental de produits industriels. En effet, une plateforme de traçabilité blockchain intégrée à une méthodologie de calcul d'impact permettrait de disposer de données transparentes et traçables le long de la chaîne de valeur d'un produit et de répertorier aisément tous les intrants de chaînes d'approvisionnement fragmentées et complexes (Zhang et al., 2020). Le calcul d'impact pourrait ainsi s'appuyer sur des données fiables, améliorant sa valeur et sa représentativité (Teh et al., 2020) et facilitant la démarche d'écoconception. En tenant compte de ces avantages potentiels soulignés dans la littérature, la partie suivante présente les 2 articles qui proposent une intégration d'un modèle ACV-blockchain.

2.6 Modèles d'intégration ACV-blockchain

2.6.1 Cadre d'intégration et architecture d'un système ACV-blockchain

Tout d'abord, Zhang et al. (2020) proposent un cadre d'intégration ainsi qu'une architecture système d'un modèle ACV-blockchain. Pour développer le cadre d'intégration, l'article propose une décomposition selon les 4 phases de réalisation d'une ACV présentées en partie 2.3.2. Le système proposé dans cet article ne dépend pas uniquement d'une plateforme de traçabilité blockchain, mais également d'autres technologies de l'industrie 4.0 (IoT et Big Data analytics). Ces technologies sont alors reliées aux différentes phases de réalisation de l'ACV sous forme d'un cadre d'implémentation schématique qui modélise les interactions entre technologies (figure ci-dessous).

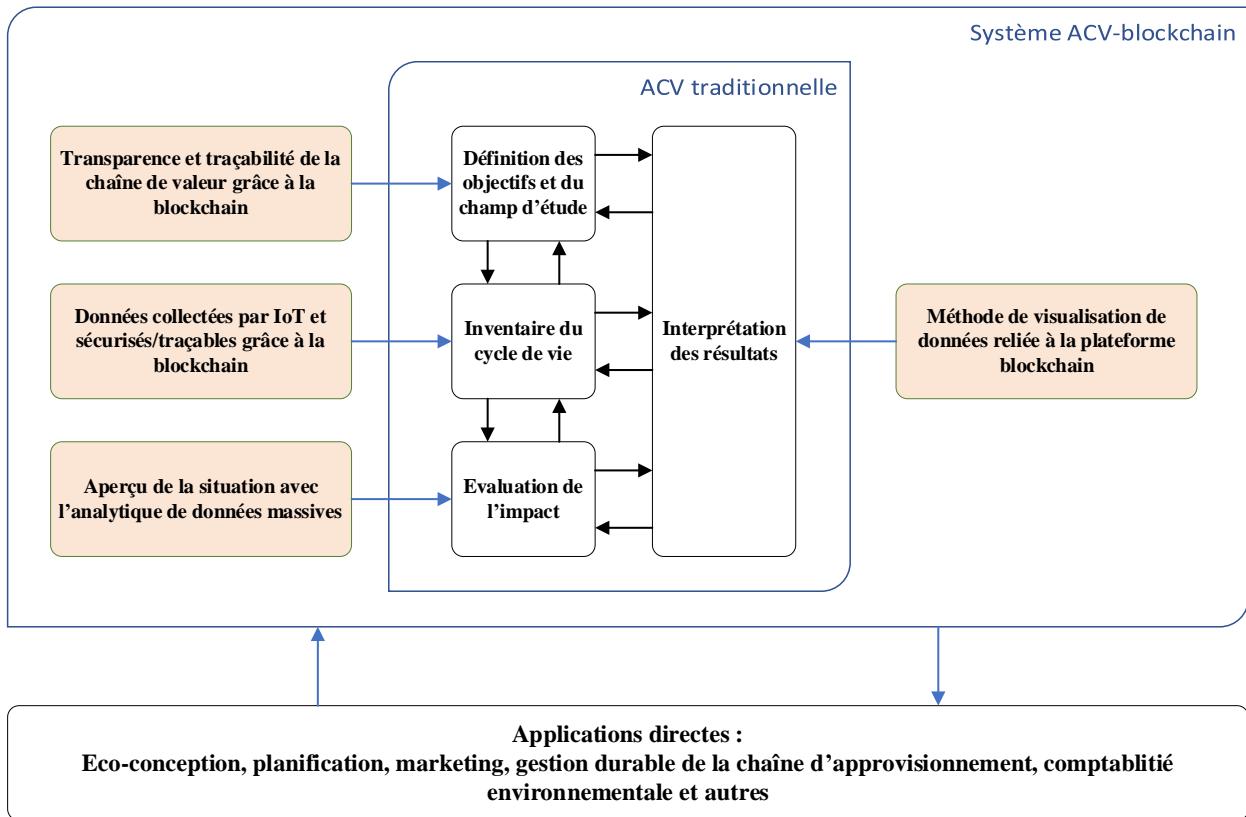


Figure 2.3 : Cadre d'intégration d'un système ACV-blockchain (adapté de Zhang et al., 2020)

Les interactions de ce système innovant selon les 4 phases de l'ACV sont les suivantes :

1. Pour la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'hypothèse de Zhang et al. est que la traçabilité blockchain peut apporter des données quantitatives sur un produit qui

permettent un jugement plus objectif de l'unité fonctionnelle adéquate à choisir. Ainsi, un système de traçabilité blockchain déjà implémenté permettra de simplifier grandement la définition des objectifs du projet ainsi que le périmètre d'étude du produit grâce à l'apport de transparence. Cependant, il reste encore à définir le niveau d'intégration souhaité à cette étape en fonction de la précision d'information recherchée pour l'ACV.

2. Pour l'analyse de l'inventaire, la quantification des flux de matériau et d'énergie se fait à l'aide d'IoT et de traçabilité blockchain. Des capteurs IoT viennent collecter l'information en temps réel directement à la source et la plateforme de traçabilité blockchain se charge de sécuriser cette donnée et de la rendre accessible de manière décentralisée. L'ensemble des données collectées sur la chaîne d'approvisionnement et enregistrées sur la plateforme peuvent alors être utilisés pour l'ICV. Cela permet également d'améliorer l'exhaustivité de prise en compte des différents flux pour l'ACV. C'est sans doute pour cette phase d'ICV que l'apport de la traçabilité blockchain est le plus important, car elle permet de mieux spécifier et mieux modéliser le cycle de vie du produit et donc d'améliorer la représentativité des résultats d'ACV.
3. Pour la phase d'évaluation de l'impact, l'analyse des données massives collectées par IoT et enregistrées dans la blockchain permet d'accélérer la prise de décision environnementale en permettant l'analyse de données auparavant inaccessibles. L'article reste cependant assez évasif sur les implications du système ACV-blockchain à ce stade.
4. Enfin, pour la phase d'interprétation des résultats, il est proposé d'intégrer des outils de visualisation des données qui permettraient d'enregistrer directement des graphiques de synthèse de l'impact environnemental du produit sur la plateforme blockchain. Cela permettrait aux différents acteurs ayant accès à la plateforme de visualiser directement l'impact de leurs différents lots de produits avec un lien entre les traces blockchain et leur impact environnemental.

Le cadre d'implémentation détaille également les applications directes que pourrait avoir ce système ACV-blockchain au sein de l'entreprise. Par exemple, l'écoconception sera facilitée par des résultats d'ACV beaucoup plus représentatifs et précis et surtout obtenus plus simplement. Le marketing sera aussi impacté, car les entreprises pourront facilement afficher l'impact environnemental de leurs produits au consommateur en liant le résultat d'impact ACV enregistré

sur la plateforme blockchain à un outil de restitution au consommateur. Ce cadre d'implémentation a par la suite été validé par trois experts en technologie blockchain.

Le deuxième apport de l'article de Zhang et al. (2020) correspond à une proposition d'architecture système pour le modèle ACV-blockchain qui explique comment transformer le cadre d'intégration en système opérationnel.

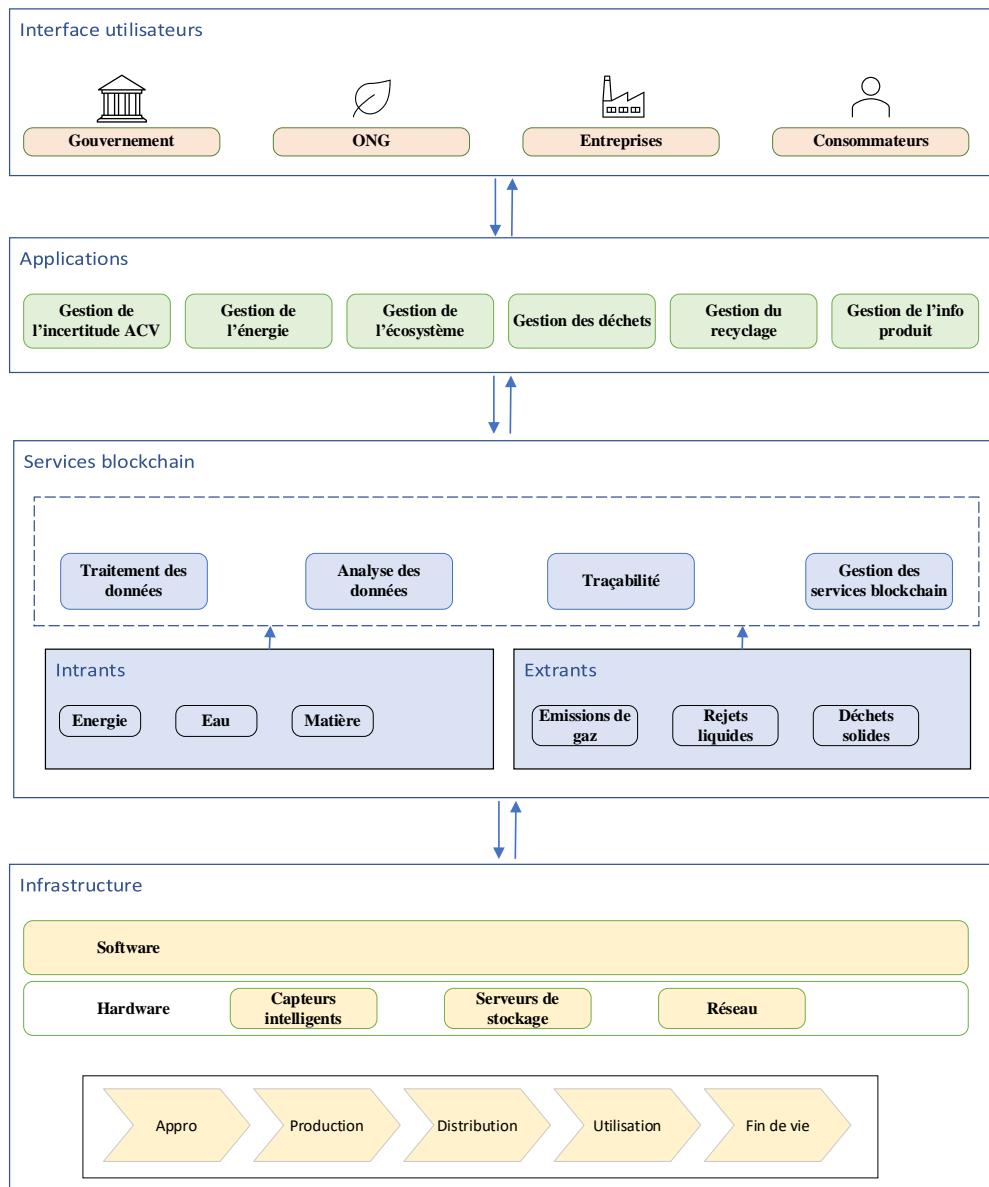


Figure 2.4 : Architecture d'un système ACV-blockchain (adapté de Zhang et al., 2020)

Cette architecture comporte 4 couches :

- Une couche d'infrastructure : il s'agit de la couche chargée de collecter, transmettre et enregistrer les données de manière sécurisée;
- Une couche de services blockchain : elle permet de connecter la couche d'infrastructure à la couche d'applications en traitant, nettoyant et analysant les données enregistrées sur la plateforme blockchain;
- Une couche d'applications : elle est responsable de la visualisation des données et constitue le support principal à la prise de décision; et
- Une couche d'interface utilisateur : c'est la couche d'interaction de l'utilisateur avec le système. C'est à travers l'interface qu'il pourra définir les objectifs et le périmètre de l'étude ACV qu'il souhaite.

La collecte de données se fait dans la couche d'infrastructure de manière automatique grâce à des capteurs IoT (compteurs électriques, d'eau, de gaz intelligents). Ces données sont transmises au logiciel par un réseau puis transmises aux couches supérieures par une passerelle. Dans la couche de services blockchain, les données vont alors être enregistrées dans une base de données et exploitées pour le calcul d'impact grâce à 4 services :

1. Le service de traitement des données qui nettoie et traite les données brutes, permettant le calcul des empreintes carbone et des ACV.
2. Le service d'analyse de données qui permet de dégager de l'information à partir des données traitées et de faciliter la prise de décision environnementale.
3. Le service de traçabilité qui met à disposition des outils de visualisation des données.
4. Le service de gestion blockchain qui permet la gestion et la mise à jour des services précédents.

Par la suite, la couche d'application divise les informations obtenues suivant six aspects environnementaux spécifiques et la couche d'interface permet un accès au système à des acteurs variés (ONG, gouvernements, entreprises et consommateurs).

Cet article constitue une première contribution indispensable à un début de mise en pratique de la théorie sur les avantages de la blockchain pour le calcul d'impact environnemental. Cependant, malgré l'orientation processus du cadre d'analyse proposé, celui-ci propose uniquement de faire

un lien entre les différentes phases de réalisation d'une étude ACV et la contribution de différents outils technologiques pour simplifier la réalisation de ces phases (traçabilité blockchain, IoT, Big Data...). Pour ce faire, il reprend uniquement le processus normalisé de réalisation d'une étude ACV et n'aborde pas les processus relatifs à la gestion de projet ou les processus relatifs à la traçabilité blockchain de produits. L'article ne détaille pas non plus les processus d'implantation d'un système ACV-blockchain ou même la démarche à adopter pour lier l'ensemble de ces technologies à une méthodologie ACV. Il manque donc un apport à la fois technique et méthodologique pour compléter les résultats de cet article. Les apports des différentes technologies pour la réalisation des phases ACV sont bien spécifiés, mais l'article se contente finalement d'évoquer ces apports de manière macro sans aller plus loin dans l'opérationnalisation de ce raisonnement. De même, les différentes applications possibles d'un système ACV-blockchain sont énumérées, ce qui permet de justifier l'apport direct de l'implantation d'un tel système. Cependant, il n'est pas non plus mentionné dans l'article la manière dont un système ACV-blockchain serait intégré pour servir ces différentes applications (écoconception, planification, marketing) aux autres systèmes d'information et de gestion déjà existants de l'entreprise et quel serait son périmètre d'action ainsi que les acteurs impliqués dans son implantation et son utilisation quotidienne.

2.6.2 Concept d'un système ACV-blockchain dans le secteur de l'aéronautique

Toujours dans l'optique d'opérationnaliser un système liant ACV et technologie blockchain, Rolinck et al. (2021) ont proposé un modèle de gestion de données basé sur la blockchain afin de simplifier la réalisation des ACV et ont discuté de son application pour la maintenance aéronautique, qui est une étape clé de l'impact environnemental d'un avion sur son cycle de vie. Il ne s'agit donc pas ici d'une plateforme de traçabilité de produits, mais bien d'un système d'agrégation des données.

La phase d'ACV directement concernée par ce modèle est la phase d'ICV, pour laquelle l'apport de la traçabilité blockchain est le plus significatif. L'article introduit donc un schéma conceptuel d'implémentation d'un système de gestion de données basé sur la blockchain et pour l'ACV (voir la figure suivante).

Ce modèle comporte 5 couches, assez différentes des 4 couches définies par Zhang et al. (2020) :

- Une couche des parties prenantes : présente les différents acteurs liés aux projets de maintenance d'avions;
- Une couche du système de produit : effectue la collecte des données primaires des processus liés au cycle de vie d'un avion à partir des infrastructures techniques déjà existantes. Les règles de répartition entre données primaires et secondaires doivent avoir été fixées avant la mise en place de ce système ;

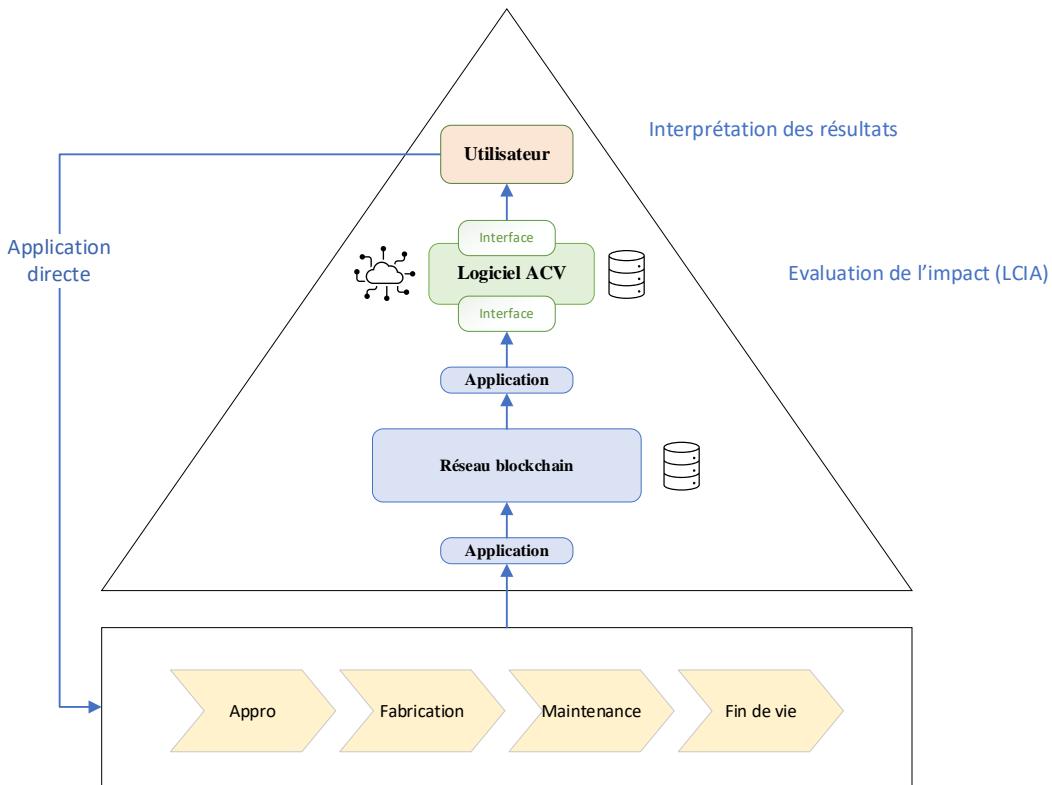


Figure 2.5 : Concept d'un système de gestion de données basé sur la blockchain pour l'ACV (adapté de Rollinck et al., 2021)

- Une couche SI Blockchain : l'ensemble des données collectées auprès des SI des différentes parties prenantes sont alors enregistrées sur un réseau blockchain décentralisé, auxquels tous les acteurs ont au moins un nœud d'accès;
- Une couche de logiciel et base de données ACV : une application permet la requête des données primaires d'inventaire enregistrées dans la blockchain. Cette couche permet l'exportation des données dans un logiciel ACV, qui permet de définir l'objectif et le

périmètre de l'étude. Les données manquantes sont alors complétées par des données de base génériques d'ACV externes. Le calcul ACV est réalisé dans cette couche; et

- Une couche d'interface utilisateur : les résultats d'ACV obtenues par le logiciel sont alors transmis à l'interface utilisateur pour permettre la visualisation des résultats. Ces utilisateurs peuvent être des compagnies aériennes, des fabricants de pièces, des entreprises de maintenance...

Un intérêt majeur de cette contribution est le cas d'étude de ce modèle pour la maintenance des aubes de turbine, sur la base d'Hyperledger Fabric, un cadre de blockchain modulaire open-source. Un processus de maintenance d'une aube de turbine standardisé en 4 étapes est présenté (inspection, enlèvement de l'ancien revêtement, soudage et pose du nouveau revêtement). L'ensemble des intrants de matériaux et d'énergies nécessaires à chaque étape sont répertoriés. Une transaction contenant l'ensemble des données sur ces intrants est alors enregistrée sur la blockchain, correspondant au passage de la couche du système de produit à la couche SI Blockchain du modèle précédent. Les flux intrants et extrants sont alors soit mesurés directement ou calculés à l'aide d'un Smart Contract à partir des données disponibles. Une requête est alors effectuée pour importer ces données dans le logiciel ACV.

Par rapport au modèle de Zhang et al. (2020), ce modèle est plus lisible et schématise mieux l'enchaînement des étapes de réalisation de l'ACV à partir de données de production enregistrées sur une blockchain. Il détaille également de manière plus simple l'implication de chacune des couches dans la réalisation de l'ACV. Enfin, il propose une mise en pratique du modèle. Cependant, il est d'un niveau de précision inférieur, notamment sur les liens entre les couches, la manière dont les données sont transférées ou encore la caractérisation des données exploitées par ce modèle. De plus, il évoque une manière logique de pré-organiser les données d'intrants et d'extrants pour le calcul ACV à partir de Smart Contracts sans pour autant présenter les règles logiques utilisées.

2.6.3 Limites des articles ACV-blockchain et apports de ce mémoire

Comme détaillé dans les paragraphes précédents, les articles de Zhang et al. (2020) et de Rollinck et al. (2021) sont des contributions absolument fondamentales pour comprendre l'intérêt et les larges possibilités d'application de systèmes ACV-blockchain pour l'industrie manufacturière et pour justifier l'utilisation de la traçabilité blockchain pour différentes phases de réalisation d'une

ACV. Elles permettent également d'aborder de manière macro des propositions d'architecture système d'ACV-blockchain en identifiant les acteurs qui se serviraient d'un tel système et l'organisation des différentes couches d'infrastructure, de service et d'application. La plus grande limite identifiée est que ces deux contributions ne permettent pas l'opérationnalisation de tels systèmes, car elles ne proposent pas de méthodologie clé-en-main qui permettrait à une entreprise intéressée par la valorisation de ses données de traçabilité pour réaliser des ACV de se lancer dans un tel projet. De nombreux aspects nécessaires à l'opérationnalisation des systèmes ACV-blockchain sont manquants dans ces articles :

- L'identification et le séquencement des activités d'un projet d'implantation d'un système ACV-blockchain. Ces processus devraient englober à la fois des éléments méthodologiques relatifs à la gestion de projet, à la réalisation d'études ACV ainsi qu'à l'opérationnalisation d'un système de traçabilité blockchain. Ce séquencement devra définir l'interaction entre les différentes activités et leur ordre de réalisation;
- L'identification des acteurs impliqués directement dans le projet d'implantation puis dans l'utilisation par la suite du système ACV-blockchain. Les rôles de chacun de ces acteurs devraient être clairement définis et les différentes activités de réalisation du projet affectées à chacun des acteurs. Les relations entre les acteurs devraient également être abordées;
- La définition des différents livrables et des jalons du projet. Pour opérationnaliser un système ACV-blockchain, il faudrait définir un cadre explicitant l'ensemble des documents à rédiger au cours du projet et identifiant les responsables de chacun des livrables du projet;
- Une vision itérative de l'implantation devrait également être apportée pour permettre à l'entreprise de gérer le niveau de complexité qu'elle souhaite pour la réalisation du projet et visualiser en amont le processus complet d'implantation avant de prendre une décision sur la réalisation ou non du projet;
- La vision de gestion du changement qui sera nécessaire pour garantir l'acceptation par les acteurs du projet et les utilisateurs du système. Sans prise en compte de cette dimension, les projets d'implantation de systèmes ACV-blockchains pourraient être voués à l'échec;
- Un processus d'affaires pour la caractérisation des données clés de traçabilité qui seraient utilisées pour le calcul ACV; et

- La détermination de la gouvernance du système une fois opérationnel ainsi que des règles d'utilisation et d'évolution.

Constatant l'ensemble de ces limites, la contribution de ce présent mémoire est donc de proposer un processus d'implantation de systèmes ACV-blockchain qui apporte une réponse complète à celles-ci et qui serait une méthodologie pour son opérationnalisation. Son originalité est de proposer un processus uniifié avec une vue sous le prisme de différents domaines : l'ACV, la traçabilité blockchain et la gestion de projet. En complément, pour bien définir les limites et les barrières auxquelles peuvent s'attendre les entreprises qui souhaiteraient utiliser cette méthodologie opérationnelle, une revue de littérature de ces limites est proposée dans le paragraphe suivant.

2.7 Limites et barrières d'adoption de ces modèles

Même si peu de contributions ont été faites pour développer des modèles d'intégration ACV-blockchain, ce champ de recherche a suscité un certain intérêt sur les avantages de tels systèmes, mais aussi sur leurs limites ainsi que leurs difficultés d'implémentation. Kouhizadeh et al. (2021) proposent de diviser les limites d'implantation de systèmes ACV-blockchain en 4 catégories :

1. Les barrières technologiques. La blockchain est une technologie qui n'est pas encore complètement mature avec des problèmes de scalabilité (Bakarich et al., 2020), de débit de données et de latence (Zhao et al., 2019) qui rendent difficile la gestion d'un nombre croissant de transactions. Ces problèmes ont cependant déjà été majoritairement surmontés avec les dernières versions de BC. De plus, l'interopérabilité de tels systèmes est également un point d'attention important pour leur implantation (Paliwal et al., 2020).
2. Les barrières organisationnelles. Le coût d'un système blockchain-ACV peut être assez important pour son implantation et sa maintenance (Zhang et al., 2020). Un point de vigilance pour l'implantation de tels systèmes serait de s'assurer de l'adhésion de l'ensemble des parties prenantes et des organes de direction et de leur bonne compréhension des apports de la technologie blockchain (Farooque et al., 2020).
3. Les barrières de la chaîne d'approvisionnement. Les acteurs d'une chaîne de valeur pourraient être réticents à communiquer leurs données sensibles (Kamble et al., 2020) et il faut ainsi les informer sur la confidentialité que permet la blockchain. De plus,

l'hétérogénéité des pratiques et la multiplicité des acteurs sur la chaîne d'approvisionnement peuvent atténuer la collaboration et freiner le déploiement de tels systèmes (Saberi et al., 2018).

4. Les barrières liées à l'environnement de travail. Le manque de régulation entourant la technologie blockchain par les gouvernements peut également être un frein à son adoption pour assister le calcul d'impact (Kouhizadeh et al., 2021).

Malgré l'ensemble de ces freins, les différents articles analysés font consensus pour dire que la traçabilité blockchain aura dans le futur un rôle majeur à jouer dans le développement durable des industries et dans l'opérationnalisation de la traçabilité environnementale.

2.8 Enseignements et perspectives

Dans la littérature analysée, on a pu tout d'abord constater un intérêt certain pour la technologie blockchain et ses applications industrielles dans le cadre du développement durable (1830 résultats dans Scopus). Cet intérêt est récent, les premiers articles datant de 2017, et surtout en pleine croissance. L'application de la blockchain pour la traçabilité de produits est également largement discutée dans la littérature scientifique (3368 résultats sur Scopus) et présentée comme la technologie actuellement incontournable pour la traçabilité. Étonnamment, l'application de la traçabilité blockchain pour le développement durable des industries, c'est-à-dire l'union des deux premiers thèmes ci-dessus, est cependant beaucoup moins discutée dans la littérature (94 résultats sur Scopus). Ces articles étaient, dans l'immense majorité des cas, une présentation théorique des opportunités de la traçabilité blockchain pour assurer des chaînes de valeur de produits durables dans des secteurs industriels variés (agroalimentaire, mode et luxe, pharmaceutique, industrie minière...). Ils confrontaient les différents apports de la technologie blockchain avec les différents enjeux durables des chaînes de valeur afin d'aboutir à la conclusion que la blockchain était un élément de réponse à ces enjeux. Certains articles allaient un peu plus loin en proposant d'utiliser la traçabilité blockchain pour le calcul d'impact de produits en évoquant les problèmes qui pourraient être résolus concernant la complexité de l'évaluation d'impact.

Cependant, la littérature analysée manque cruellement de contributions sur la mise en pratique et l'opérationnalisation de ces modèles ACV-blockchain, pourtant identifiés comme des réponses potentielles majeures aux problèmes de collecte de données des chaînes d'approvisionnement.

Seuls les 2 articles présentés en partie 2.6 proposent des modèles d'intégration ACV-blockchain. Ils sont un apport riche pour l'opérationnalisation de tels systèmes, car ils définissent des exemples d'architecture de construction et montrent les interactions entre les différentes technologies nécessaires au fonctionnement de la réalisation d'ACV basées sur la traçabilité blockchain. Ils apportent également des informations vitales sur la manière d'organiser le traitement et la restitution des données. Cependant, les procédures de transfert de données de ces systèmes restent encore à clarifier ainsi que la spécification des données utilisées dans chaque couche. Un détail des interconnexions techniques serait donc un apport important à ces contributions. De plus, aucune indication n'est donnée sur la manière de mettre en place un tel système et sur les processus d'implantation à suivre. Il manque donc une véritable méthodologie d'implémentation pour permettre aux entreprises disposant déjà d'une infrastructure blockchain de lier cette infrastructure avec une méthode de calcul d'impact et de permettre ultimement d'associer à chaque chaîne de traçabilité blockchain une valeur d'impact environnemental. Enfin, il manque également un retour d'expérience de l'implémentation d'un tel système dans un contexte industriel, qui permettrait de quantifier ses apports, d'identifier les facteurs de succès de son implémentation et de poser ses limites d'utilisation.

À la suite de l'absence de méthodologie pour implémenter les systèmes ACV-blockchain dans la littérature, l'originalité de cette étude sera d'aboutir à une méthodologie d'implémentation en consultant à la fois des experts en traçabilité blockchain et des experts en ACV. Cette méthodologie pourra alors être testée sur un cas d'étude afin de valider son utilisation et de mesurer le gain de performance du calcul ACV réalisé au cours de l'implantation du système. Une réflexion pourra également être amorcée sur l'utilité d'un calcul d'ACV dit « dynamique », c'est-à-dire actualisé pour chaque chaîne de traçabilité, dans le cadre d'une valorisation marketing d'un produit. Il pourrait alors être intéressant de quantifier l'apport de valeur ajouté au produit grâce à la mesure de son impact.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre a tout d'abord pour but de présenter les différents objectifs de recherche qui répondent à la problématique identifiée à la suite de la revue de littérature et des perspectives de recherche dégagées. À partir de ces objectifs de recherche, une méthodologie de recherche a été établie pour mener à bien le projet.

3.1 Définition des objectifs de recherche

Il est tout d'abord à signaler que ce projet de recherche était un projet complètement nouveau dans lequel tout était à faire. Au début du projet, Crystalchain, entreprise qui a financé et hébergé le projet, était intéressée pour développer sa plateforme de traçabilité blockchain et y intégrer un module RSE, afin d'aider ses clients à piloter leur stratégie durable.

À la suite d'une revue de littérature poussée, la problématique de recherche suivante a pu être dégagée : *Comment les données de traçabilité issues d'une plateforme blockchain peuvent-elles permettre d'améliorer le calcul ACV de produits industriels?*

Pour répondre à cette problématique, l'objectif principal de cette recherche sera de *développer et expérimenter une méthodologie d'implantation d'un système de traçabilité ACV-blockchain dans un cadre industriel.*

Cet objectif principal comprend plusieurs sous-objectifs :

- Sous-objectif 1 : Évaluer les apports potentiels d'une plateforme de traçabilité blockchain pour le calcul ACV et analyser les modèles d'intégration existants.
- Sous-objectif 2 : Définir les besoins opérationnels de mesure d'impact des acteurs industriels et identifier leur convergence avec les modèles de la littérature.;
- Sous-objectif 3 : Proposer une méthodologie de projet d'implantation d'un système ACV-blockchain; et
- Sous-objectif 4 : Expérimenter la méthodologie proposée et quantifier le gain en représentativité du système intégré par rapport à une ACV traditionnelle.

3.2 Méthodologie de recherche

Pour répondre à chacun de ces 4 sous-objectifs, la méthodologie de recherche suivante a été suivie.

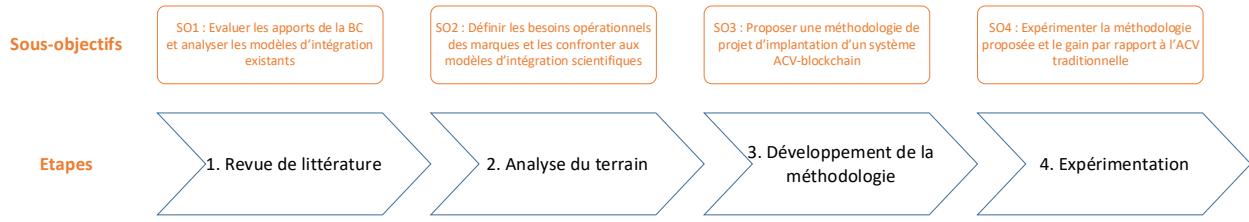


Figure 3.1 : Méthodologie suivie pour répondre aux sous-objectifs de recherche

Tout d'abord, afin de répondre au SO1, une revue de littérature systématique mêlant les concepts de blockchain, de traçabilité et d'impact environnemental a été menée, comme explicitée en partie 2. Cette revue de littérature a donné lieu à la rédaction et à la soumission d'un article pour la conférence APMS de septembre 2021 à Nantes, traitant des opportunités des données de traçabilité blockchain pour le calcul d'impact environnemental. La publication a été acceptée et le processus de correction demandé par un comité d'experts a permis de valider l'apport de la contribution et d'améliorer sa réalisation. Le besoin d'amélioration des ACV par la traçabilité blockchain a donc clairement été jugé pertinent pour le comité d'experts, faisant écho aux observations qui avaient été faites sur le terrain auprès des experts RSE, des fédérations et des entreprises interrogés. De plus, les deux modèles d'implantation d'un système ACV-blockchain issus de la revue de littérature ont été analysés plus finement et leurs contributions respectives ont été détaillées. Cela a permis de poser les bases de l'état existant de la connaissance scientifique sur ce domaine et de déterminer la structure type d'un tel système.

Pour répondre au SO2, des observations et une expérience terrain dans l'écosystème des entreprises françaises de la mode et du luxe ont été réalisées. Plusieurs entretiens avec des consultants RSE, des fédérations professionnelles et des marques de mode ont permis de dégager les besoins opérationnels des marques et de les faire converger avec les enseignements et les lacunes tirés de la revue de littérature.

La réponse au SO3 s'est faite en plusieurs parties. Tout d'abord, un premier projet de traçabilité de l'empreinte carbone de la filière cachemire d'une grande marque de luxe française a été mené. Il s'agissait d'un projet de démonstration pour la marque afin de lui montrer le potentiel de la solution de traçabilité blockchain pour tracer ses émissions carbone de la ferme jusqu'en boutique. Ce projet

a également permis de mieux appréhender les différents processus d'affaires pour la réalisation d'un projet de traçabilité environnementale et donc d'établir une première itération de la méthodologie d'implémentation avant d'établir la version finale suite au projet d'expérimentation. La méthodologie développée combine à la fois des processus d'affaires relatifs à la gestion de projets de traçabilité, à la réalisation d'une étude ACV et à l'intégration technique des systèmes. Les différents processus sont basés sur des référentiels existants et vérifiés par des experts :

- Les processus de gestion de projet de traçabilité sont basés sur le standard de traçabilité développé par l'UNECE pour les filières textiles et cuir et sur la méthode de gestion de projet de traçabilité développée par Crystalchain. Ils ont été validés par les experts en traçabilité de Crystalchain;
- Les processus relatifs à la réalisation d'une étude ACV sont basés sur la méthodologie normalisée par les normes ISO 14040 et 14044. Ils ont été validés par un expert en ACV du CIRAI;
- Les processus relatifs à l'intégration technique des systèmes sont basés sur la méthodologie d'intégration technique des projets de traçabilité de Crystalchain.

Enfin, la réponse au SO4 a été faite par une étude de cas en partenariat avec un leader mondial de la transformation de produits textiles. La méthodologie a pu être testée sur un cas réel à partir de données de traçabilité d'une filière laine, de la ferme à la sortie de l'usine de peignage. Les processus 1 à 5 de la méthodologie ont pu être testés dans le cadre de ce projet. Les processus 6 à 8, qui correspondent à l'intégration technique et à l'automatisation du calcul d'impact à partir de la plateforme de traçabilité, n'ont pas pu être suivis car les délais de la maîtrise recherche étaient trop courts par rapport au processus de décision de l'entreprise de valider et poursuivre l'intégration.

CHAPITRE 4 OBSERVATIONS DU TERRAIN ET PRÉSENTATION DES ACTEURS DU PROJET

4.1 Confirmation des objectifs de recherche avec l'expérience terrain

Pour venir confirmer les lacunes observées dans la littérature scientifique et valider les objectifs de recherche, un travail d'observation et d'expérience du terrain a été nécessaire.

Ce travail croisé de revue de littérature et d'expérience terrain a été mené pour identifier une convergence entre les besoins opérationnels des clients et les lacunes de la littérature scientifique sur la traçabilité environnementale par blockchain. L'expérience terrain a notamment consisté en plusieurs entretiens avec des consultants en RSE, des fédérations professionnelles et des marques principalement dans le secteur de la mode. Le tableau ci-dessous illustre la convergence des problématiques issues de la littérature scientifique et du terrain opérationnel.

Tableau 4.1 : Convergence des observations du terrain et de la revue de littérature

Observations terrain	Lacunes de la littérature
1. Les entreprises ont besoin de prouver leurs engagements pour valoriser leurs produits	A. Peu d'applications de la traçabilité blockchain pour le développement durable.
2. Les entreprises veulent la transparence totale de leur chaîne de valeur	B. Complexité de la collecte des données d'ACV irrésolue
3. La réglementation et l'attente des consommateurs rendent la mesure d'impact incontournable	C. Littérature très théorique sur les avantages de la traçabilité blockchain pour le calcul d'impact
4. Les certifications environnementales ne suffisent pas à garantir qu'un produit est respectueux de l'environnement	D. Intérêt démontré pour les systèmes intégrés blockchain-ACV sans mise en pratique ou méthodologie d'intégration

4.2 Présentation du partenaire industriel de recherche : Crystalchain

Crystalchain a financé ce projet de recherche et a donné l'accès à l'ensemble de son système de traçabilité blockchain ainsi qu'aux différents outils de traçabilité qu'elle a développés. Il s'agit d'une entreprise experte dans le secteur de la traçabilité blockchain, leader en Europe, et basée à Paris depuis 2016. Elle emploie 18 personnes et a été cofondée par Sylvain Cariou, Jean Piquet et Pierre Achach, qui cumulent 100 années d'expérience dans le secteur du conseil aux entreprises. Elle est dirigée par Sylvain Cariou.

Crystalchain a développé une forte expertise des problématiques de traçabilité sur plusieurs secteurs variés tels que l'agroalimentaire, la mode et le luxe ou les matières premières avec des clients prestigieux tels que Carrefour, Chargeurs, Burger King ou Suez. L'entreprise a développé une méthode de gestion de projet de traçabilité éprouvée et propose une plateforme de traçabilité blockchain complète. Elle s'occupe d'accompagner le client dans sa spécification du besoin de traçabilité, de définir avec lui les éléments à tracer et les traces à enregistrer sur la plateforme et de déployer une plateforme robuste et facilement adaptable en fonction des besoins. Un projet de traçabilité mené par Crystalchain se décompose ainsi principalement en 2 phases : une phase de cadrage et de spécification et une phase d'implantation technique et de mise en production de la plateforme de traçabilité.

L'entreprise propose à ses clients une gamme de fonctionnalités très complète :

- Une plateforme de traçabilité décentralisée basée sur la blockchain, sur laquelle les traces de production peuvent être importées depuis des fichiers Excel, depuis les SI de l'entreprise, par SMS ou même être directement saisies sur la plateforme;
- Un outil de visualisation des chaînes de traçabilité pour vérifier l'origine des produits;
- Un outil de visualisation de l'activité de l'entreprise par tableaux de bord. Ceux-ci peuvent avoir des objectifs variés en fonction du projet : surveiller la qualité des produits, gérer les stocks et les approvisionnements, lutter contre la sous-traitance non déclarée, piloter une filière éthique (gestion des certifications éthiques, visualisation de l'impact des fournisseurs et des activités, évolution de l'empreinte carbone...); et
- Un système de restitution des informations de traçabilité sur le smartphone des consommateurs par un QR Code apposé sur le produit. Un consommateur peut ainsi

connaître l'origine précise, les étapes de transformation et les acteurs qui ont contribué à l'élaboration du lot de produit qu'il achète.

La figure ci-dessous montre un exemple simplifié de l'utilisation de la plateforme de Crystalchain par une entreprise pour piloter une filière textile et communiquer sur ses engagements éthiques auprès du consommateur. Cet exemple a été choisi, car il correspond à l'utilisation de la plateforme par le partenaire industriel de ce projet, Chargeurs, qui sera présenté au paragraphe suivant.

Exemple : Piloter une filière éthique

Objectif : garantir auprès des clients (B2B) l'origine et l'éthique de la matière première



Figure 4.1 : Exemple d'utilisation de la plateforme Crystalchain pour une filière textile
(Crystalchain, 2020)

Il est à noter que le projet de recherche présenté dans ce mémoire a été l'un des nombreux projets d'une démarche plus globale initiée par Crystalchain pour intégrer les problématiques de RSE et de développement durable dans sa proposition de valeur auprès de ses clients. Un autre projet intimement lié à celui-ci a été mené auprès de l'ADEME dans le cadre de l'expérimentation de l'affichage environnemental. Son objectif a été de définir un cadre et une méthodologie pour aboutir à une note environnementale à partir d'une ACV basée sur les données de traçabilité blockchain de produits agroalimentaires. La méthodologie développée dans le cadre de ce projet de recherche a donc été bénéfique pour la réalisation de ce projet agroalimentaire.

4.3 Présentation du partenaire industriel d'expérimentation : Chargeurs

Le groupe Chargeurs est un leader mondial de la transformation textile qui regroupe 4 métiers : Chargeurs Protective Films, Chargeurs PCC Fashion Technology, Chargeurs Museum Solutions et Chargeurs Luxury Materials. La dernière division de l'entreprise opère sur la filière de la laine et propose à ses clients des laines parmi les plus luxueuses et résistantes au monde. Le groupe a pour mission de choisir son approvisionnement en laine dans différentes fermes à travers le monde et de réaliser les étapes de première transformation de la laine pour aboutir à des lots de fibres de laine prêts à être filés (appelés « wool tops »). Ces lots de laine sont alors vendus aux clients pour filature puis confection textile.

Fortement impliqué en RSE, Chargeurs a lancé en 2017 un label écoresponsable et de respect du bien-être animal, le label Organica Precious Fiber, renommé label Nativa par la suite. Ce label s'appuie indissociablement sur la traçabilité de la laine haut de gamme de Chargeurs, qui est assurée par Crystalchain. Ainsi, depuis 2017, Crystalchain fournit à Chargeurs une plateforme de traçabilité pleinement opérationnelle qui trace les lots de laine depuis leur ferme d'origine jusqu'à la confection de vêtements. De nombreuses données sont ainsi disponibles sur la plateforme concernant chaque lot de laine, notamment l'origine, la composition des lots, la finesse des fibres, les volumes de lots, les processus suivis, les dates et acteurs de transformation...

Alors que Chargeurs a fait part en début d'année à Crystalchain de sa volonté de mesurer l'empreinte carbone précise de ses lots de laine, nous leur avons fait une proposition visant à valoriser leurs données de traçabilité déjà enregistrées sur la plateforme Crystalchain pour la mesure de l'empreinte carbone de leurs activités. Nous avons par la suite étendu le périmètre à l'ensemble des indicateurs environnementaux en leur proposant d'utiliser la méthodologie d'ACV pour réaliser une mesure d'impact complète sur leurs lots de laine. Les principaux objectifs de ce projet pilote étaient :

- Pour Chargeurs, de comprendre la manière dont les données de traçabilité déjà collectées sur la plateforme blockchain peuvent être facilement valorisées pour un calcul d'impact. C'est un premier projet avant une éventuelle opérationnalisation complète d'un système ACV-blockchain;

- Pour Crystalchain, de valider la possibilité d'intégration à la plateforme de traçabilité d'un module de calcul d'impact environnemental; et
- Pour le projet de recherche, d'établir une méthodologie d'implantation d'un système ACV-blockchain en liant les méthodes d'ACV, de gestion de projet et de mise en place d'une traçabilité blockchain. Également, l'objectif était d'expérimenter l'apport des données de traçabilité sur la performance des ACV à partir de données industrielles réelles.

La méthodologie unifiée d'implantation ACV-blockchain présentée en chapitre 5 a ainsi été élaborée à partir :

- Des référentiels relatifs à l'ACV (série ISO 14000), des référentiels relatifs aux projets de traçabilité blockchain (référentiel de l'UNECE sur la traçabilité des filières textiles et cuir et méthode d'intégration technique de Crystalchain) et des référentiels de gestion de projets technologiques (méthode de gestion de projet développée par Crystalchain); et
- De la conduite du projet pilote avec Chargeurs, qui a permis d'affiner et d'améliorer la méthodologie en la rendant plus proche de la réalité opérationnelle et moins théorique.

Le chapitre 6 présentera alors la conduite du projet pilote avec le partenaire industriel Chargeurs en détail et comment celui-ci a permis d'expérimenter sur l'apport des données de traçabilité pour l'amélioration des ACV.

CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'IMPLANTATION D'UN SYSTÈME ACV-BLOCKCHAIN

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie d'implantation d'un système ACV-blockchain, qui permet d'utiliser des données enregistrées sur une plateforme de traçabilité pour la réalisation d'une ACV. Cette méthodologie se veut suffisamment générique pour pouvoir être applicable dans des secteurs industriels variés. Dans un premier temps, les prérequis à l'emploi de cette méthodologie et les objectifs attendus seront formulés. Ensuite, les acteurs d'un tel projet et le choix du formalisme de modélisation des processus d'affaires seront justifiés. Enfin, les processus de niveaux 1 et 2 seront explicités.

5.1 Prérequis

Cette méthodologie a été développée dans le cadre du travail de recherche effectué chez Crystalchain. Il s'agit d'une entreprise leader dans la gestion de projets de traçabilité blockchain, de la spécification des besoins auprès du client jusqu'à l'intégration technique de la plateforme de traçabilité. Leur périmètre multi-secteurs (agroalimentaire, mode et luxe, énergie, économie circulaire...) est un avantage important qui a permis de généraliser la présente méthodologie.

La méthodologie de déploiement des systèmes de traçabilité de Crystalchain est donc fonctionnelle et optimisée par l'expérience de divers projets. La présente méthodologie en constitue ainsi une extension et ne couvre pas le même périmètre. Pour être mise en place, elle requiert donc que l'entreprise cliente ait déjà une infrastructure de traçabilité blockchain opérationnelle. À partir de cette infrastructure existante, elle propose d'étendre le périmètre de traçabilité pour intégrer dans chaque transaction l'ensemble des données environnementales nécessaires au calcul d'ACV d'un produit. La caractérisation de ces données sera d'ailleurs l'un des objectifs du cas d'étude au chapitre 6. Autrement dit, une entreprise qui n'aurait pas de système de traçabilité blockchain préexistant ne pourrait se servir de la méthodologie développée dans le cadre de ce projet. Il s'agit là de sa limite principale d'application.

L'entreprise industrielle qui souhaite valoriser ses données de traçabilité blockchain pour le calcul ACV doit également s'assurer dans un premier temps de l'adhésion des différentes parties prenantes de sa chaîne d'approvisionnement et de leur volonté de partager leurs données

environnementales en toute transparence. Il s'agit là de l'un des freins principaux qui pourraient ralentir l'exécution de la méthodologie, comme identifié par Kamble et al. (2020).

5.2 Acteurs du projet

Le choix du formalisme de modélisation doit être pensé afin que l'ensemble des acteurs auquel s'adresse la méthodologie puisse la comprendre facilement. Il faut donc tout d'abord définir les acteurs du projet.

Plusieurs organisations peuvent être impliquées :

1. L'entreprise cliente, qui demande l'implantation de la traçabilité. Son périmètre est l'ensemble des sites de production qu'elle détient à 100%.
2. Le fournisseur IT, qui va fournir la solution de traçabilité blockchain et accompagner le client dans la démarche de traçabilité et dans l'expression de son besoin.
3. L'entreprise de conseil, qui peut être un co-traitant du fournisseur IT pour l'assister dans la réalisation de l'ACV et mettre à disposition des experts.
4. Les fournisseurs de l'entreprise cliente. Ils seront indispensables pour fournir des données sur leurs activités de production, mais ne seront généralement pas acteurs de l'équipe projet. Cette méthodologie ne leur est donc pas directement adressée.

Le tableau ci-dessous répertorie l'ensemble des partenaires d'affaires liés au projet auquel s'adresse la méthodologie.

Tableau 5.1 : Rôles des partenaires d'affaires d'un projet ACV-blockchain

Organisation	Rôle des partenaires	Description
Entreprise cliente	Commanditaire du projet	Il s'agit de l'acteur qui demande l'implantation du système de traçabilité chez le client. Il peut se trouver à n'importe quel niveau sur la chaîne de valeur du produit. Il est le chef du projet de traçabilité chez le client.

Tableau 5.1 : Rôles des partenaires d'affaires d'un projet ACV-blockchain (suite et fin)

Entreprise cliente	Responsable de production	Il s'agit de l'acteur (ou des acteurs) qui dispose des données de production relatives aux processus de fabrication internes à un site de production détenu par l'entreprise cliente. Si plusieurs sites industriels, il peut y avoir autant d'acteurs que de sites.
Fournisseur IT	Expert en traçabilité	Il s'agit de l'acteur qui accompagne l'entreprise cliente dans la spécification de son besoin de traçabilité. Il modélise ses processus d'affaires, identifie les données de traçabilité nécessaires et construit le modèle de données ainsi que les éventuels tableaux de bord. Il est également le chef du projet de traçabilité au sein du fournisseur IT.
Fournisseur IT	Équipe technique	Il s'agit des acteurs responsables de l'intégration technique du modèle de données et des tableaux de bord à la plateforme. Ils intègrent les nouvelles fonctionnalités, documentent l'intégration et effectuent des tests de pré déploiement.
Fournisseur IT	Responsable des affaires	Il s'agit du premier interlocuteur du commanditaire du projet. Il se charge de définir les termes du contrat, de planifier le projet en consultation avec les experts de traçabilité et l'équipe technique et de gérer la relation commerciale avec le client.
Fournisseur IT/ Cabinet de conseil	Expert en ACV	Il s'agit de l'acteur responsable de la méthodologie de calcul ACV. Il se charge de définir le périmètre de l'étude avec le client, de collecter les données auprès du client, de construire le modèle ACV et de proposer une interprétation des résultats.

Cette définition des partenaires s'appuie à la fois sur l'expérience métier de Crystalchain et sur la formalisation du BPA pour la traçabilité des secteurs textiles et cuir de l'UNECE. En fonction du contexte, les partenaires peuvent être affiliés de manière différente aux organisations. De même,

un même partenaire peut avoir plusieurs rôles (par exemple, le responsable de production peut dans certains cas être le commanditaire du projet).

5.3 Objectifs de la méthodologie d'intégration

Comme mentionné précédemment, la présente méthodologie a pour objectif de proposer un séquencement des activités nécessaires pour établir un système intégré de traçabilité blockchain et de calcul ACV et d'attribuer ces activités aux différents acteurs du projet. Ainsi, l'événement de début de projet correspond au besoin d'une entreprise de tracer l'impact environnemental d'un de ses produits. Cet événement lance la séquence d'intégration qui a plusieurs événements de fin possibles :

- Après la réalisation d'une première ACV d'évaluation du produit, l'entreprise souhaite aller plus loin et signe un contrat avec le fournisseur IT pour automatiser ce calcul d'impact. Ainsi, une fois que la chaîne de traçabilité d'un produit dans la plateforme sera entièrement renseignée, une évaluation d'impact de cette chaîne sera automatiquement calculée et la valeur d'impact sera enregistrée dans une transaction blockchain liée à la chaîne de traçabilité. On dispose alors d'un véritable système intégré ACV-blockchain; et
- Après la réalisation d'une première ACV d'évaluation du produit, l'entreprise ne souhaite pas investir pour automatiser le calcul ACV. Le fournisseur IT lui communique seulement les résultats de l'étude ACV d'évaluation menée sur son produit, qui ne sera pas recalculée. L'entreprise peut alors choisir de communiquer l'impact de son produit au client, mais en sachant que cet impact est variable et peu représentatif. Dans ce cas, le système ACV-blockchain n'a pas été implémenté.

Aussi, les objectifs de la méthodologie dépendent des différents acteurs du projet :

- Pour le fournisseur IT : permettre de déployer efficacement une fonctionnalité de traçabilité environnementale sur la plateforme grâce à une séquence détaillée des opérations à mener et des documents de travail à produire;
- Pour le client : permettre de visualiser la démarche qu'il devra entreprendre s'il veut effectivement déployer la traçabilité environnementale sur un de ses produits. La visualisation de la démarche complète peut lui permettre d'identifier d'éventuels points de

complexité à adresser, d'estimer les ressources à allouer à un tel projet et de mieux comprendre son implication. La méthodologie définit également les activités qu'il doit mener et les documents de travail qu'il doit produire.

5.4 Choix du formalisme de modélisation

Afin de construire notre méthodologie, nous recherchons un formalisme de modélisation des processus d'affaires qui soit intuitif et facilement compréhensible par l'ensemble des acteurs du projet qui travaillent dans des domaines d'expertise très variés. Pour aider à faire ce choix, Wang et al. (2006) ont proposé une comparaison des principales méthodes de modélisation des processus (BPEL4WS, BPMN, UML, XPDL et PetriNet). La méthode BPMN y est présentée comme un standard de modélisation qui facilite la communication entre les utilisateurs d'affaires et les utilisateurs techniques de processus d'affaires complexes. Le résultat de cette étude comparative est que la méthode BPMN semble être la plus concise et est particulièrement adaptée à la modélisation des processus d'affaires, par rapport notamment à la méthode UML qui n'adopte pas un langage métier. La méthode BPMN est donc préférable pour la communication des différents métiers selon un langage commun unique et compréhensible de tous.

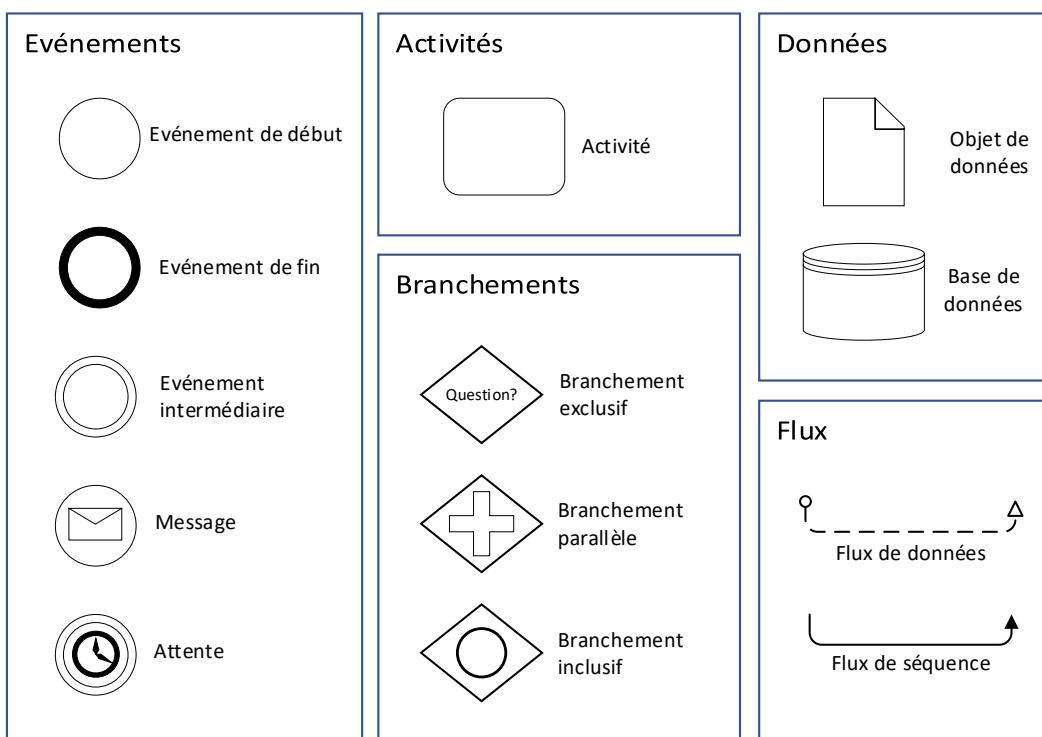


Figure 5.1 : Éléments de modélisation BPMN

En complément, Grigorova et Mironov (2014) ont comparé les trois méthodes de modélisation de processus d'affaires les plus populaires : BPMN, EPC et BPEL. La méthode BPEL a fortement décliné à partir de 2007 au profit de la méthode BPMN, ils proposent donc de comparer uniquement les méthodes BPMN et EPC. Ces méthodes ont un niveau d'expressivité quasiment similaire et les modélisations peuvent d'ailleurs facilement être converties d'un formalisme à l'autre. Cependant, la méthodologie BPMN semble l'emporter légèrement concernant la compacité et le degré d'expression de la logique d'affaires. Finalement, le formalisme BPMN sera préféré à l'EPC pour notre méthodologie, plus en raison de l'expérience passée avec ce formalisme que pour des raisons d'efficacité. Les principaux éléments utilisés dans les diagrammes BPMN ainsi que leur signification sont détaillés dans la figure ci-dessus.

5.5 Processus de niveau 1

La figure ci-dessous représente la modélisation du processus d'intégration d'un système ACV-blockchain. Elle se décompose en 8 sous-processus détaillés dans la partie suivante. Les 4 premiers sous-processus permettent de préparer le terrain pour réaliser une première ACV d'évaluation et pour évaluer la possibilité d'extension du modèle de traçabilité blockchain. Par la suite, deux processus peuvent être exécutés en parallèle :

- La réalisation de l'ACV d'évaluation à partir de données spécifiques de production collectées auprès des acteurs de la chaîne d'approvisionnement du produit; et
- La préparation de la plateforme de traçabilité pour l'automatisation du calcul d'impact. Le suivi de ce processus jusqu'au bout dépend principalement de la volonté de l'entreprise cliente de disposer d'un système de calcul d'impact dynamique basé sur ses données de traçabilité. Un point d'arrêt de ce processus sera la prise de décision par l'entreprise de valider ou non l'extension de son périmètre de traçabilité aux données environnementales.

Chacun des 8 sous-processus va donc être décrit dans l'ordre logique de séquencement des activités, et les principaux livrables à chaque étape seront identifiés.

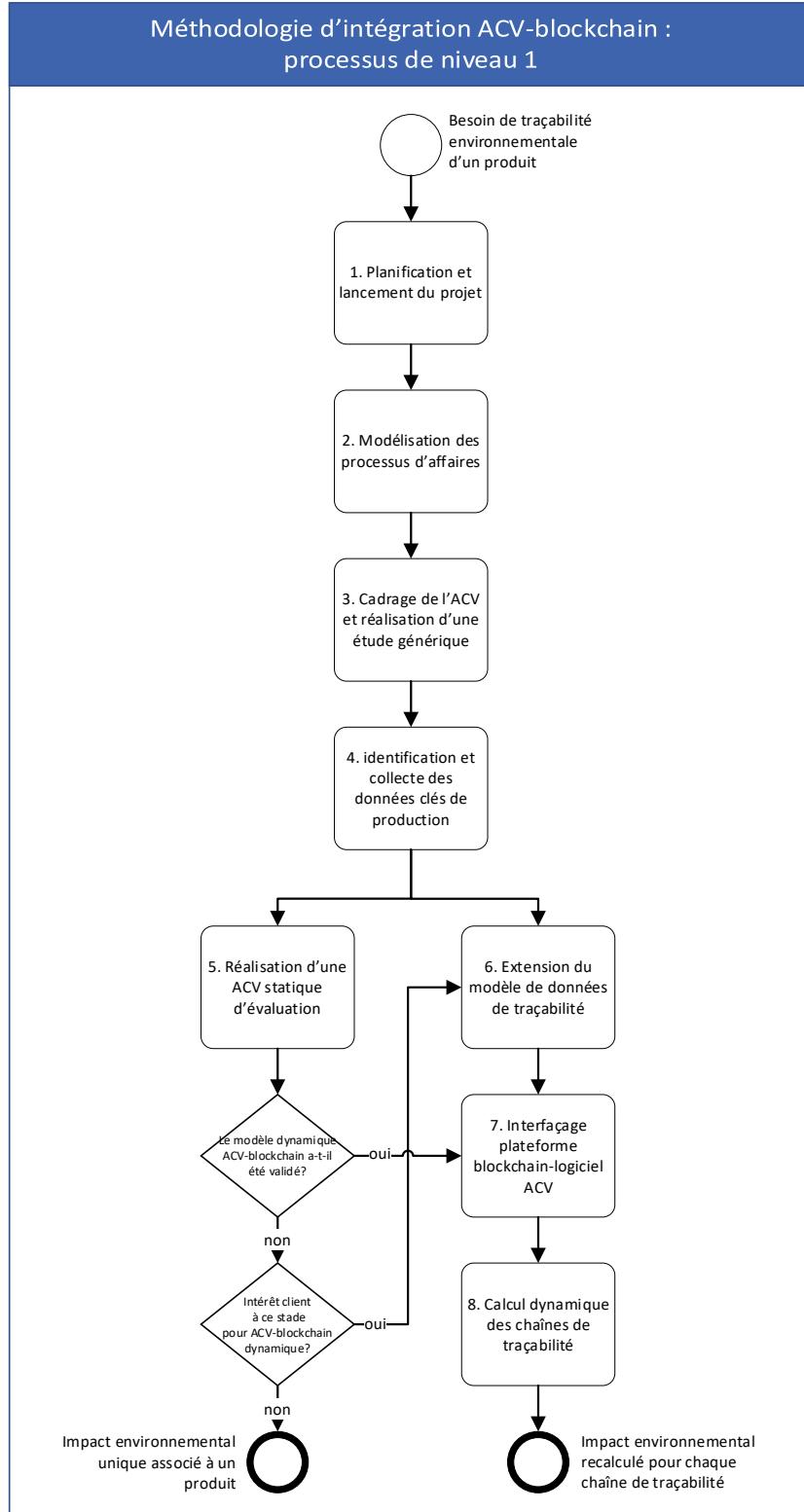


Figure 5.2 : Processus de niveau 1 de la méthodologie
d'intégration

5.6 Sous-processus de niveau 2

5.6.1 Processus de planification et lancement de projet

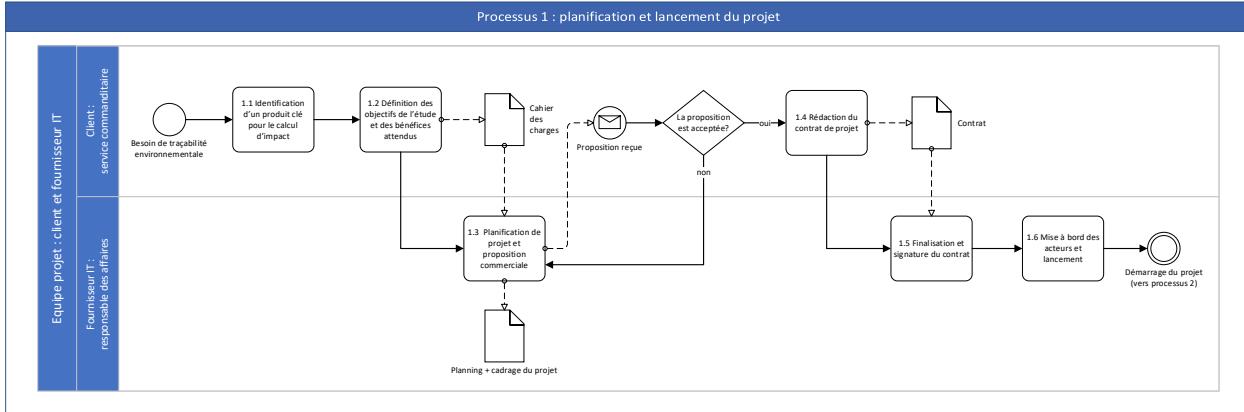


Figure 5.3 : Processus 2.1, planification et lancement de projet

Le premier sous-processus est composé de 6 activités dont l’objectif est de définir le cadre général et le périmètre du projet. À partir d’un besoin de traçabilité environnementale exprimé par le client, ce processus permet d’aboutir au démarrage effectif du projet. Les livrables attendus sont un cahier des charges fonctionnel, un document de planification et de cadrage du projet et un contrat de projet. Le cahier des charges fonctionnel est initialement rédigé par le client une fois qu’il a identifié le produit prioritaire pour une étude d’impact (activité 1.1) ainsi que les objectifs de l’étude et les bénéfices attendus (activité 1.2). Ce cahier des charges peut également être enrichi et complété de manière itérative par l’expert en traçabilité du fournisseur IT, qui peut accompagner le client dans l’expression de son besoin fonctionnel. Une fois le cahier des charges rédigé, il est transmis au responsable des affaires du fournisseur IT qui se charge d’élaborer la planification du projet (activité 1.3) en consultation avec l’ensemble des acteurs du projet. Le document de planification devrait contenir la durée du projet, les grandes étapes de réalisation, les dates clés, les jalons, l’allocation des ressources humaines, le budget estimé, les principaux risques et incertitudes (Gardiner, 2005). Des éléments de cadrage devront également apparaître : définition du projet et périmètre, finalité, définition des rôles et de la gouvernance et méthode employée. À partir de ce document, le responsable des affaires du fournisseur IT peut envoyer une proposition commerciale au commanditaire. Si cette proposition est refusée dans un premier temps, le responsable d’affaires peut décider d’adapter sa proposition et de la soumettre à nouveau au commanditaire ou de mettre

fin au projet. Une fois la proposition acceptée par le commanditaire, il se charge d'établir un contrat (activité 1.4) et de le transmettre au responsable des affaires pour signature. Ce dernier peut alors corriger les termes du contrat en accord avec le commanditaire (activité 1.5) puis les deux parties peuvent le signer. Une fois le contrat signé, le projet est officiellement validé. Une réunion de mise à bord des parties prenantes et de lancement du projet doit alors être organisée par le responsable des affaires (activité 1.6) pour présenter le projet et ses objectifs à l'ensemble des acteurs. À partir de ce moment, c'est le chef de projet qui prend la main et se charge de coordonner l'ensemble des activités subséquentes. Dans le modèle d'affaires de Crystalchain, il s'agit majoritairement de l'expert en traçabilité qui est chef de projet, ce sera donc l'hypothèse retenue par la suite dans le cadre de cette méthodologie.

5.6.2 Processus de modélisation des processus d'affaires

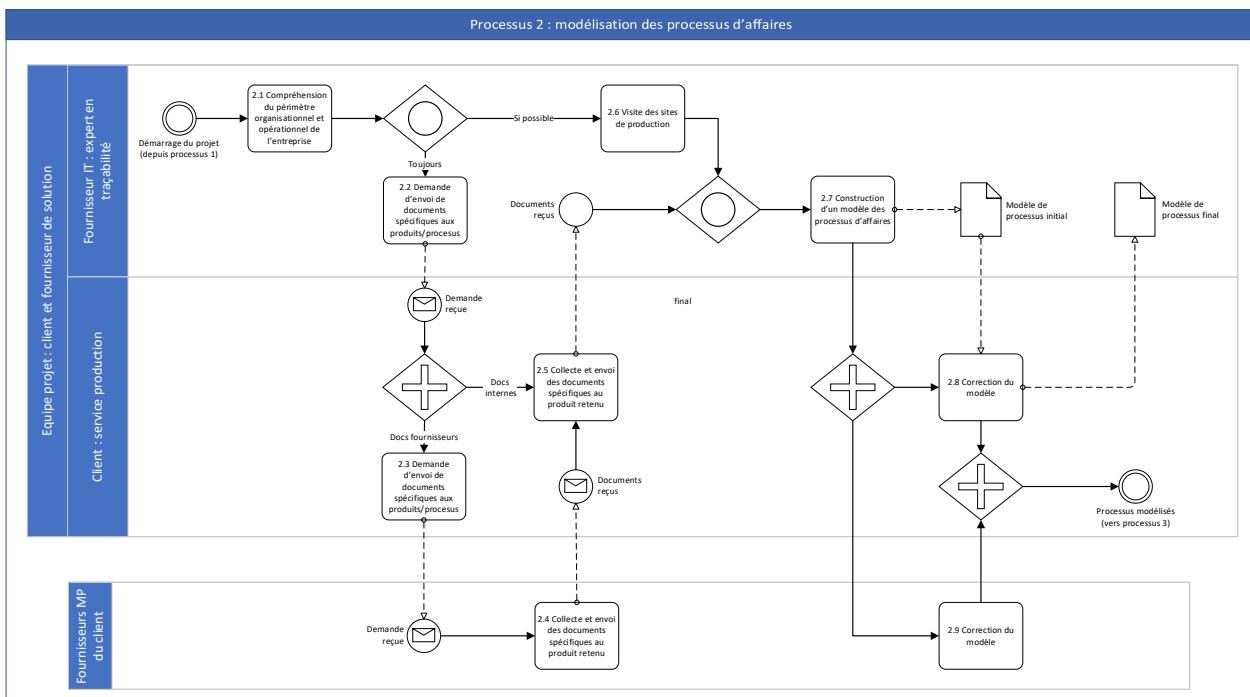


Figure 5.4 : Processus 2.2, modélisation des processus d'affaires

Le deuxième sous-processus est composé de 8 activités dont l'objectif est de modéliser au plus près de la réalité les processus d'affaires relatifs aux activités du périmètre organisationnel de l'entreprise et de ses fournisseurs concernant le produit dont l'impact est à évaluer. Si le produit défini est déjà tracé par le fournisseur IT, ce processus est redondant avec la mise en place de la traçabilité déjà effectuée, puisque l'expert en traçabilité dispose déjà d'un diagramme de flux et

connaît déjà les processus. Cependant, s'il s'agit d'un nouveau produit à tracer, le processus 2 doit être scrupuleusement suivi. Dans un premier temps, l'expert en traçabilité doit s'approprier la spécificité du périmètre opérationnel de l'entreprise (activité 2.1). Pour cela, il peut rechercher des informations sur le site internet de l'entreprise, demander des documents généraux de présentation au client ou même organiser un échange avec le client. Une fois qu'il comprend le contexte, il doit demander au responsable de production du client des documents de présentation spécifiques au produit à tracer et aux processus utilisés (activité 2.2). Ces documents peuvent par exemple être des nomenclatures de produits, des présentations de processus, des diagrammes de flux, des fiches suiveuses de production. Il est de la responsabilité de l'expert en traçabilité de répertorier et définir auprès du responsable de production l'ensemble des documents dont il aura besoin pour sa modélisation de processus. Bien entendu, en fonction du périmètre de l'étude, la modélisation des processus d'affaires des fournisseurs du client devra aussi être faite. Il incombera alors au responsable de production chez le client de transmettre la demande d'envoi de documents aux différents fournisseurs concernés (activité 2.3). Les fournisseurs se chargeront alors de collecter et transmettre les documents qui leur ont été demandés au responsable de production (activité 2.4), qui se charge alors de transmettre à l'expert en traçabilité l'ensemble des documents collectés en interne et récupérés auprès de ses fournisseurs (activité 2.5). En complément de cette collecte de documents nécessaire, l'expert en traçabilité peut organiser avec le client une visite des sites de production pour affiner encore plus sa compréhension des processus (activité 2.6). Il serait alors judicieux d'effectuer cette visite également avec l'expert ACV, qui prendra le relais de la modélisation environnementale. Une fois les documents collectés et l'éventuelle visite effectuée, l'expert en traçabilité construit une modélisation des processus d'affaires relatifs au produit, dans le périmètre d'activité complet du client et des fournisseurs impliqués (activité 2.7). Ce modèle est alors soumis au responsable de production ainsi qu'aux fournisseurs qui pourront apporter des corrections éventuelles grâce à leur expérience métier (activités 2.8 et 2.9). En sortie de ce processus, l'expert en traçabilité dispose ainsi d'une modélisation des processus d'affaires fidèle à la réalité qu'il doit transmettre à l'expert ACV pour construire sa modélisation environnementale.

5.6.3 Processus de cadrage de l'ACV et réalisation d'une étude générique

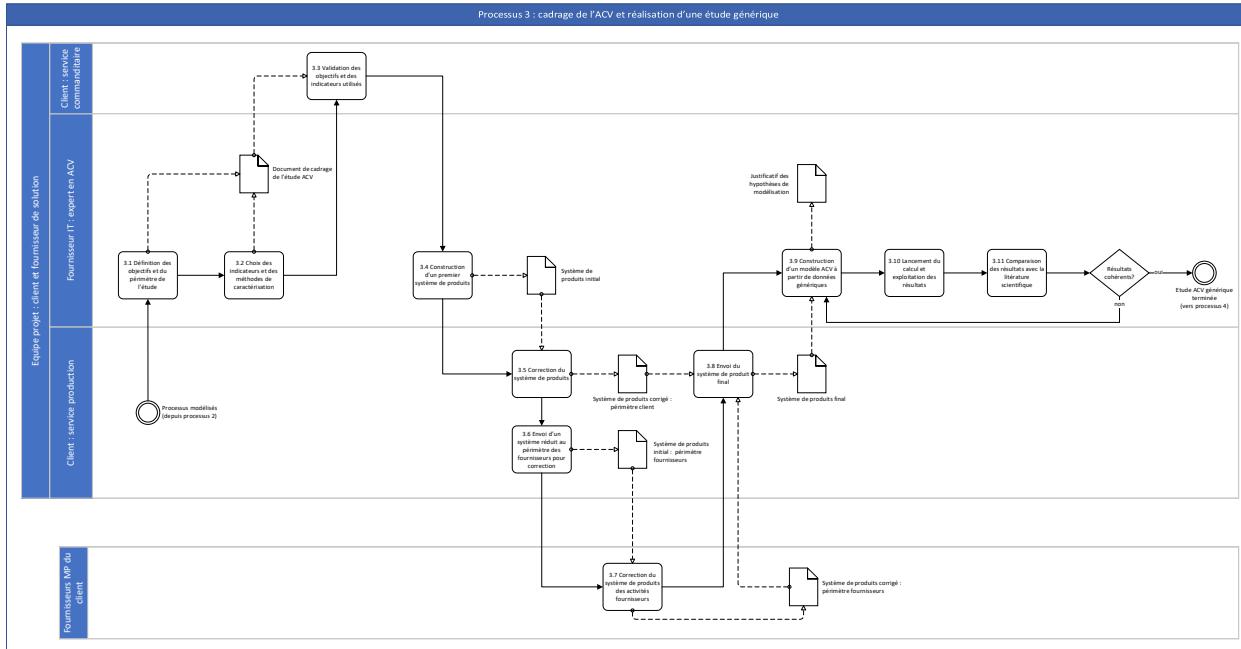


Figure 5.5 : Processus 2.3, cadrage de l'ACV et réalisation d'une étude générique

Le troisième sous-processus est composé de 11 activités dont l’objectif est de réaliser une première étude ACV générique pour le produit sélectionné à partir du diagramme de flux obtenu par l’expert en traçabilité. Cette étude est de la responsabilité de l’expert ACV. Ce sous-processus est largement inspiré de la norme ISO 14044 qui définit les étapes de réalisation d’une étude ACV et du manuel ILCD développé par le JRC, qui est le guide de référence pour la conduite des ACV. Pour commencer l’étude, l’expert ACV doit définir son périmètre et ses objectifs en concertation avec le commanditaire et basé sur les objectifs généraux du projet définis lors du processus 1 (activité 3.1). Dans le cas de cette méthodologie, il serait judicieux de définir le même périmètre pour l’ACV que pour l’ensemble du projet de traçabilité. Il définit en même temps l’unité fonctionnelle et le flux de référence de son système. En fonction des objectifs de l’étude, il se charge de choisir la méthode de caractérisation de l’impact qu’il va utiliser ainsi que les indicateurs environnementaux à prendre en compte (activité 3.2). Tous ces choix doivent être justifiés dans un document de cadrage de l’ACV qui sera envoyé au commanditaire pour validation (activité 3.3). Ce document devra contenir l’ensemble des éléments obtenus dans le cadre des activités 3.1 et 3.2. Une fois le document de cadrage validé, l’expert ACV peut commencer à modéliser son système de produit (activité 3.4). Pour ce faire, il s’inspire du diagramme de flux fourni par l’expert en traçabilité et

doit répertorier l'ensemble des intrants et des extrants pour chacun des processus élémentaires modélisés. Les intrants correspondent principalement aux matières premières, aux énergies et aux équipements et consommables utilisés pour la réalisation du processus. Les extrants correspondent au produit principal du processus et ses co-produits ainsi qu'aux émissions directes dans l'environnement et aux déchets. Pour l'aider à réaliser un recensement exhaustif des intrants et extrants, l'expert peut s'appuyer sur des modélisations de processus élémentaires similaires issus de la littérature scientifique ou de bases de données ACV génériques comme Ecoinvent. Le système de produit est ensuite corrigé par le client sur son périmètre d'activité pour inclure ou exclure des intrants/extrants relatifs à la spécificité de ses processus (activité 3.5). Ce dernier envoie alors des versions tronquées du système de produit à ses fournisseurs pour qu'ils ne puissent avoir accès qu'à la modélisation de leur périmètre d'activité et afin de garantir la confidentialité entre les acteurs (activité 3.6). Les fournisseurs corrigent alors les systèmes de produits tronqués (activité 3.7), les envoient au client qui transmet l'ensemble des systèmes de produit modifiés à l'expert ACV (activité 3.8). L'expert peut alors construire un premier modèle ACV dans le logiciel de son choix (activité 3.9). Si des études ACV du produit sont déjà existantes, il peut les utiliser pour construire son modèle générique. Sinon, il devra à minima collecter certaines données primaires principales de l'entreprise cliente avant de lancer l'ACV pour avoir des résultats à peu près représentatifs du contexte de l'étude. L'objectif est simplement de valider l'enchaînement des processus et d'estimer les points majeurs d'impact environnemental le long du cycle de vie d'un produit pour pouvoir par la suite focaliser et affiner la collecte de données sur ces points. Il devra accompagner la construction de ce modèle d'une notice justificative des hypothèses de modélisation prises en compte. L'expert pourra ensuite lancer le calcul d'impact selon la méthode de caractérisation choisie dans l'activité 3.2 et exploiter les résultats obtenus (activité 3.10). Une rapide revue de la littérature scientifique concernant les ACV menées sur des produits similaires doit alors être faite afin de valider l'ordre de grandeur des résultats d'impact obtenus (activité 3.11). À la fin de ce processus, l'étude ACV générique est terminée et validée, ce qui permet de lancer par la suite le processus d'identification et de collecte des données non immédiatement disponibles.

5.6.4 Processus d'identification et de collecte des données de production

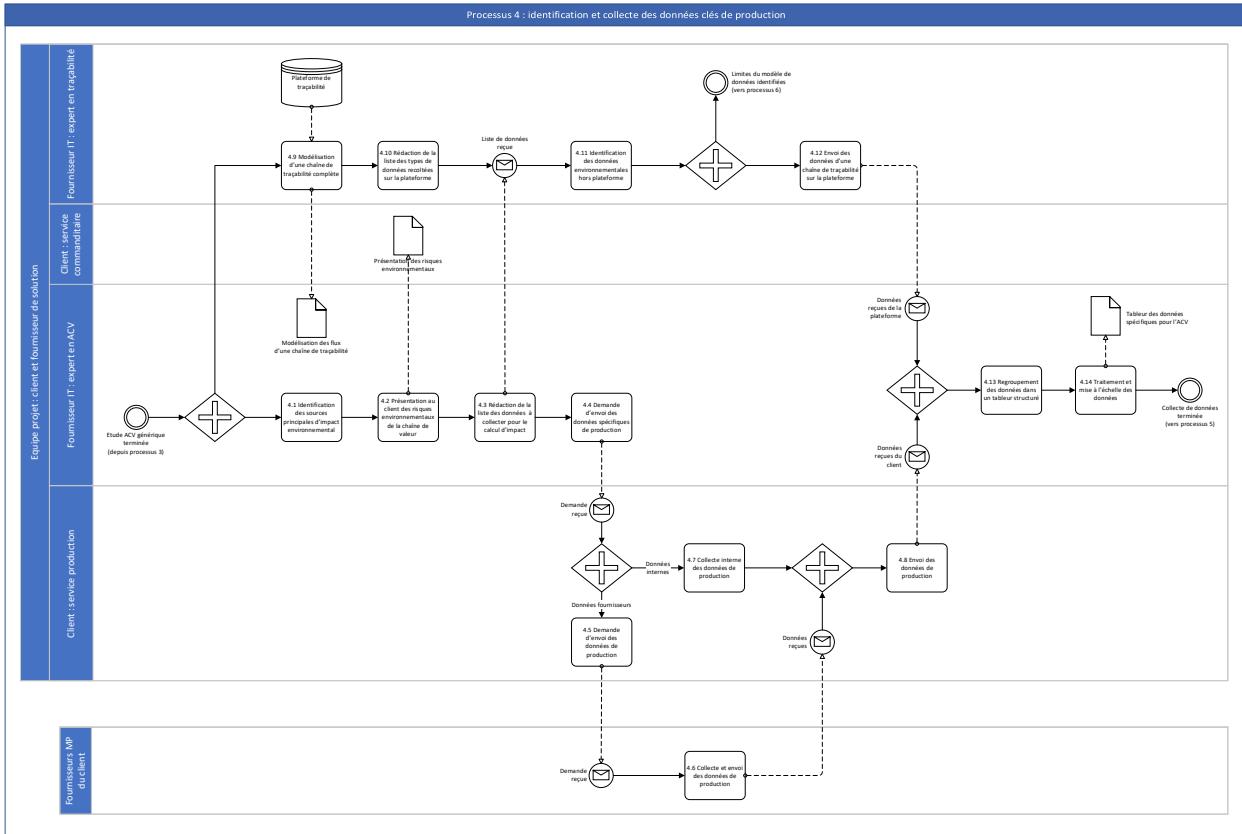


Figure 5.6 : Processus 2.4, identification et collecte des données clés de production

Le quatrième sous-processus est composé de 14 activités dont l'objectif est triple :

- Identifier les sources principales d'impact environnemental sur le cycle de vie du produit et les données clés pour la modélisation ACV;
- Parmi ces données, discriminer les données de production à collecter auprès du client et de ses fournisseurs des données de traçabilité déjà enregistrées sur la plateforme blockchain existante; et
- Organiser la collecte et le traitement des données brutes.

Ce sous-processus divise le travail en deux branches parallèles, l'une effectuée par l'expert ACV avec le soutien du client et l'autre effectuée par l'expert en traçabilité. Commençons par décrire les activités menées par l'expert ACV. Après avoir terminé l'étude ACV générique au processus 3, l'expert peut identifier les principales sources potentielles d'impact environnemental le long du cycle de vie du produit, et ce pour chaque catégorie d'impact (activité 4.1). Il présente alors ces

résultats au commanditaire du projet pour le sensibiliser aux enjeux environnementaux de sa chaîne d'approvisionnement et faciliter sa prise de décision par la suite (activité 4.2). L'expert rédige par la suite la liste exhaustive de l'ensemble des données dont il a besoin pour réaliser son étude ACV spécifique, en focalisant la densité de données à collecter sur les points majeurs d'impact (activité 4.3). Cette liste devra à minima contenir les éléments suivants : nom de la donnée, périmètre, description, type quantitatif ou qualitatif, unité, processus concerné, acteur concerné. Un classement des données par ordre de priorité peut également être intéressant si la collecte de l'ensemble des données est trop longue par rapport à la planification définie dans le processus 1. Bien entendu, il serait incomplet de se baser uniquement sur une première étude générique pour déterminer les données à collecter. Il faut aussi que l'expert ACV s'interroge sur les éventuels biais présents à différentes étapes du cycle de vie qui pourraient induire une sous-représentation de ces étapes dans l'ACV générique ainsi que sur la manière dont la chaîne de valeur spécifique diffère du cas générique. Il faudrait ainsi procéder à une analyse de sensibilité itérative au fur et à mesure de la réception des données spécifiques pour prioriser les efforts de collecte de données. La liste des données est ensuite envoyée à l'expert en traçabilité ainsi qu'au responsable de production chez le client (activité 4.4). Le responsable de production se charge alors de transmettre la liste à ses différents fournisseurs (activité 4.5) qui vont collecter les données relatives à leur périmètre d'activité et les renvoyer au responsable de production du client (activité 4.6). Ce dernier mène en parallèle la collecte de données relatives aux sites de production de son entreprise (activité 4.7) puis se charge d'envoyer l'ensemble des données collectées par lui-même et ses fournisseurs à l'expert ACV (activité 4.8).

Pendant que les activités 4.1 à 4.8 sont menées, l'expert en traçabilité se charge de modéliser les liens entre les transactions d'une chaîne de traçabilité disponible dans la plateforme blockchain (activité 4.9). Il peut choisir la chaîne à modéliser de manière arbitraire seulement si cette chaîne est complète, c'est-à-dire que le produit a été tracé du point amont au point aval du périmètre de l'étude, et s'il estime qu'il s'agit d'une chaîne de traçabilité représentative du parcours moyen du produit étudié. Ce modèle doit suivre le même standard que le modèle de données de traçabilité établi. Il joint à ce modèle une liste de l'ensemble des champs des données collectées dans chacune des traces ainsi que la valeur de ces champs pour la chaîne choisie (activité 4.10). À partir de la liste des données nécessaires pour l'ACV envoyées par l'expert ACV à la suite de l'activité 4.3, il peut alors identifier dans cette liste les données déjà enregistrées sur la plateforme blockchain et

les données manquantes qui pourraient y être enregistrées (activité 4.11). Ayant identifié les limites actuelles de la plateforme pour effectuer une traçabilité environnementale, il peut alors déclencher le sous-processus 6 qui correspond à l'étude de l'extension du modèle de données de traçabilité pour intégrer la donnée environnementale. En parallèle, il envoie l'ensemble des données de traçabilité récupérées sur la plateforme de la chaîne qu'il a sélectionnée à l'expert ACV (activité 4.12).

À ce stade, l'expert ACV dispose donc à la fois des données de production du client et de ses fournisseurs et des données de traçabilité récupérées sur la plateforme blockchain. Il se charge alors de regrouper ces données dans un tableau structuré (activité 4.13). S'il y a des doublons entre les données de traçabilité et les données de production, il faudra alors se poser la question de la confiance des données obtenues par chacun des biais. D'un côté, la confiance des données enregistrées dans la blockchain ne peut être absolue, puisque leur intégrité n'est garantie qu'à partir de leur enregistrement et une falsification en amont reste possible. De l'autre, les données de production brutes communiquées sur un tableau sont également falsifiables facilement à n'importe quel moment. La gestion des données erronées dans la blockchain constitue ainsi une vraie difficulté qui mérite d'être soulignée et le développement d'indicateurs de confiance fait d'ailleurs l'objet de plusieurs sujets de recherche en cours. Il ne pourra donc pas être recommandé dans ce mémoire une manière de gérer ces données erronées. On peut toutefois estimer que privilégier les données issues de la plateforme blockchain pourrait être un bon début, puisqu'y est garanti la vérifiabilité des acteurs et la fiabilité des données une fois enregistrées. Ensuite, il s'occupe de nettoyer et de traiter les données (activité 4.14) pour les adapter à la logique du modèle d'ACV spécifique qu'il souhaite construire (conversion des unités, règles d'allocation des flux, mise à l'échelle des flux...). Il se charge donc ainsi durant cette activité de la répartition des impacts par unité de production des données brutes globales qui lui sont fournies. Les mesures extensives doivent ainsi être converties et allouées à différents flux par l'expert ACV, en concertation avec le fournisseur de données et selon l'expertise de ce dernier concernant l'allocation des flux. De la même manière, la périodicité de chaque transaction devra être définie conjointement avec le fournisseur de données en fonction du format des données brutes extensives disponibles. La conversion de données brutes de production en coefficients d'émission devra faire l'objet d'une étude plus poussée, dépendante de la réalité de chaque chaîne de valeur et de la manière dont les données sont collectées et enregistrées. Deux implantations différentes pourraient ainsi être

envisagées : on pourrait dans un premier cas enregistrer uniquement les données brutes de production dans la blockchain et fixer les règles d'allocation et de transformation en coefficients d'émissions dans le logiciel ACV, qui viendrait chercher en entrée des données brutes. On peut dans un second cas imaginer que les coefficients d'émissions sont directement enregistrés dans la blockchain après traitement des données brutes et que les données de la plateforme blockchain sont directement exploitables dans le logiciel ACV pour lancer le calcul d'impact. Il faudrait alors inventorier les avantages et les inconvénients de chacune de ces deux possibilités en fonction du contexte et des objectifs du projet.

5.6.5 Processus de réalisation d'une ACV statique d'évaluation

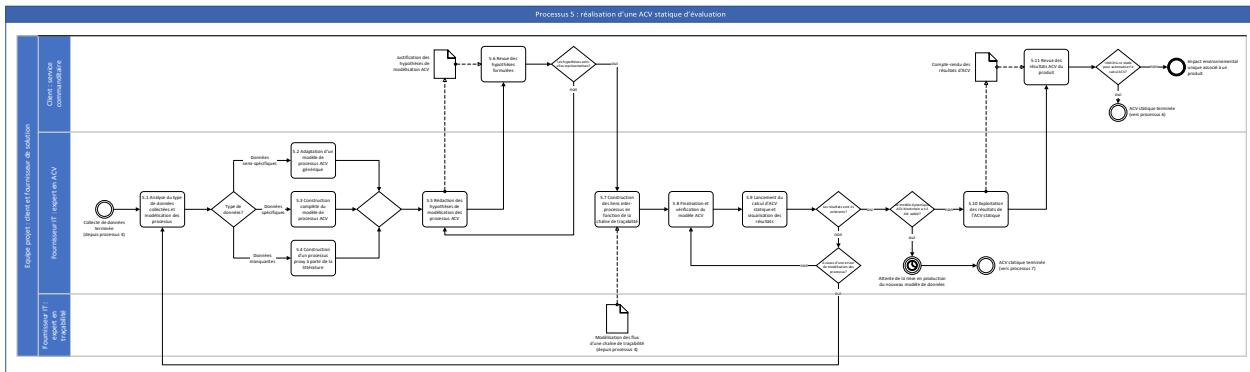


Figure 5.7 : Processus 2.5 : réalisation d'une ACV statique d'évaluation

Le cinquième sous-processus est composé de 11 activités dont l’objectif est de réaliser une ACV statique d’évaluation du produit à partir des données collectées auprès du client et de ses fournisseurs et depuis la plateforme. L’apport de ce second modèle ACV est donc l’utilisation de données spécifiques. Après avoir regroupé les données dans un tableau au cours du sous-processus précédent, l’expert ACV procède à l’évaluation des données collectées. Il identifie les données manquantes qui n’ont pas pu être communiquées par le client et ses fournisseurs et segmente l’ensemble des données qu’il va utiliser pour le modèle ACV en 3 catégories (activité 5.1), qui sont les catégories identifiées par l’ADEME dans ses principes généraux de l’affichage environnemental des produits de consommation :

- Les données spécifiques, qui sont mesurées ou calculées par l'entreprise. Elles sont issues d'une collecte de données;

- Les données génériques, qui sont des données moyennes propres au secteur et utilisées par toutes les entreprises. Elles sont issues de bases de données ACV; et
- Les données semi-spécifiques, qui sont des données proposées par défaut et que l'entreprise peut remplacer par des données spécifiques.

En fonction de la catégorisation de ces données, il aura 3 manières de faire distinctes pour construire les modèles de processus dans le logiciel ACV :

- S'il dispose uniquement de données semi-spécifiques qui ne permettent pas de qualifier et de quantifier l'ensemble des intrants et des extrants d'un processus élémentaire, il utilise un processus élémentaire équivalent issu d'une base générique d'ACV et l'adapte pour remplacer les données par défaut par des données spécifiques (activité 5.2);
- S'il dispose de toutes les données spécifiques nécessaires à la modélisation complète d'un processus élémentaire, il se charge de modéliser intégralement ce processus (activité 5.3), c'est-à-dire de répertorier et de quantifier l'ensemble des intrants et des extrants à partir des données collectées; et
- S'il ne dispose d'aucune donnée relative à un processus élémentaire d'arrière-plan (par exemple, le processus de production de l'électricité utilisée pour la manufacture d'un produit industriel), il utilise un processus élémentaire générique équivalent issu d'une base de données ACV (activité 5.4).

Une fois que l'expert ACV a modélisé l'ensemble des processus élémentaires d'après les règles énoncées ci-dessus, il se charge de rédiger une note détaillant et explicitant l'ensemble des hypothèses de modélisation qu'il a faites pour construire ces processus et les sources de données qu'il a utilisées (activité 5.5). Cette note sera transmise au commanditaire du projet qui se chargera d'étudier la validité de ces hypothèses concernant ses activités de production (activité 5.6) et, le cas échéant, de les valider ou de demander une correction du modèle ACV et une révision des hypothèses. Lorsque l'ensemble des processus élémentaires ont été modélisés séparément dans le logiciel ACV et que les hypothèses de modélisation ont été validées par le commanditaire, l'expert ACV se charge de construire les liens entre ces processus (activité 5.7). Pour ce faire, il se base sur la modélisation des flux de la chaîne de traçabilité étudiée par l'expert en ACV dans le cadre du processus 4. À cette étape de la méthodologie, le modèle de l'ACV statique d'évaluation sera donc

celui d'une chaîne de traçabilité unique. Les liens entre les processus du modèle ACV reprennent donc les liens entre les processus de cette chaîne. Les processus élémentaires modélisés dans le cadre des activités 5.2 à 5.4 qui n'appartiennent pas à la chaîne de traçabilité étudiée ne sont tous simplement pas reliés à ce modèle ACV. Ainsi, l'objectif des premières activités de ce processus était de modéliser l'ensemble des processus élémentaires possibles. Par la suite, il s'agira de modular les relations entre ces processus en fonction de la spécificité de la chaîne de traçabilité étudiée.

Une fois le modèle d'ACV terminé, l'expert se charge de vérifier son intégrité (activité 5.8) : il vérifie notamment la bonne mise en relation des processus, les formules de calcul utilisées, la bonne déclaration des paramètres locaux et globaux. Pour réaliser cette étape, il peut par exemple afficher le modèle graphique de son système de produit sur le logiciel ACV pour vérifier la bonne mise en relation des processus. Une fois le modèle vérifié, il lance alors le calcul ACV et analyse les premiers résultats obtenus (activité 5.9). Si ces résultats semblent cohérents en comparaison avec les autres études déjà réalisées sur le même produit (mêmes ordres de grandeur, catégories d'impact majoritaires qui correspondent à celles attendues), l'expert ACV devra se renseigner auprès du responsable des affaires du fournisseur de solution pour savoir si le client est satisfait du début de projet et souhaite continuer en automatisant le calcul d'impact de ses produits et en le liant avec ses données de traçabilité blockchain. Si le client souhaite automatiser son calcul d'impact pour le rendre dynamique, il faut alors attendre la fin de la réalisation du processus 7, qui correspond à l'interfaçage entre la plateforme de traçabilité et le logiciel ACV. Si le client ne souhaite pas continuer l'automatisation pour l'instant, l'expert ACV va se charger d'exploiter les résultats de l'ACV statique qu'il vient de réaliser (activité 5.10) en établissant un compte-rendu des résultats d'impact. Il va alors présenter ces résultats au client (activité 5.11) et lui délivrer le compte-rendu en lui montrant la variabilité potentielle de l'impact des produits en fonction de leur provenance et de leur année de production par exemple. Si le client n'est toujours pas intéressé pour un calcul ACV dynamique, le projet prend fin : le temps de chacun n'aura pas été perdu puisque le projet aura en réalité permis une étude ACV unique d'un produit de l'entreprise cliente. Si le client est finalement intéressé, le processus d'ACV statique est terminé et on peut passer au processus 6.

5.6.6 Processus d'extension du modèle de données de traçabilité

Ce processus a pour objectif de spécifier le cadre et les limites de l'extension du modèle de données de traçabilité existant pour y intégrer un maximum de données exploitables pour l'ACV. Il peut démarrer uniquement une fois que les limites du modèle de données de traçabilité actuel ont été identifiées dans le cadre du processus 4.

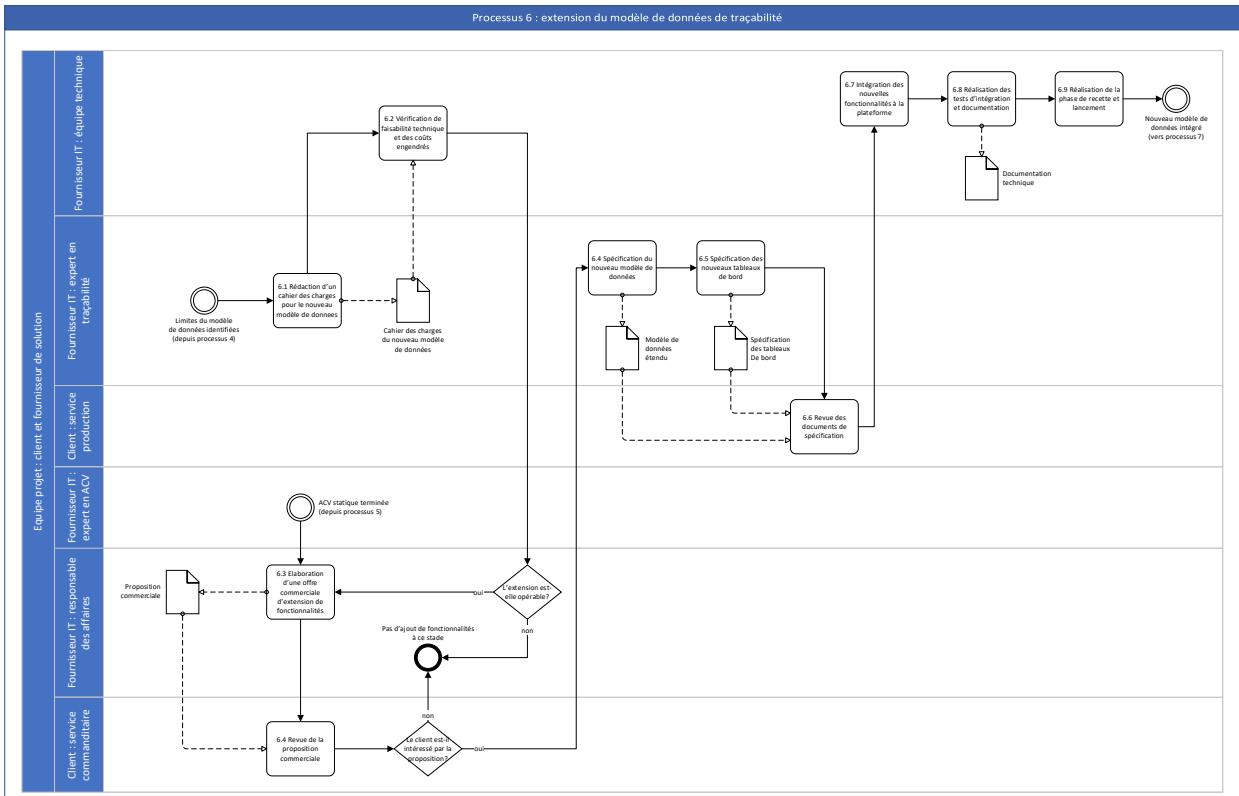


Figure 5.8 : Processus 2.6, extension du modèle de données de traçabilité

Le client n'a pas nécessairement validé le projet d'automatisation de son calcul d'impact à ce stade. L'expert en traçabilité connaît à cette étape l'ensemble des données de production dont il aurait besoin pour que l'expert ACV puisse réaliser son étude. Il sait également parmi ces données lesquelles sont enregistrées dans la plateforme de traçabilité et lesquelles ne le sont pas. À partir de cette connaissance, il se charge de rédiger un cahier des charges pour le nouveau modèle de données (activité 6.1). Ce cahier des charges devra définir précisément les nouvelles données qui seront ajoutées au modèle de données de traçabilité à chaque étape de production et comment elles seront collectées sur la plateforme. Il communique ensuite ce cahier des charges à l'équipe technique qui se chargera de valider la faisabilité technique de cette extension, c'est-à-dire

d'estimer le temps de développement nécessaire, et d'estimer les ressources à allouer à un tel projet et la disponibilité de ces ressources (activité 6.2). Si l'extension du modèle de données proposée est jugée opérable par l'équipe technique, le responsable des affaires se charge de rédiger une proposition d'offre commerciale au client et de lui présenter (activité 6.3). Le client peut alors prendre le temps d'étudier cette proposition et d'y effectuer éventuellement des modifications (activité 6.4). Si cet ajout de fonctionnalités est validé par le client qui est intéressé par la proposition, la phase de spécification du projet peut commencer. Tout d'abord, la phase de spécification du nouveau modèle de données (activité 6.4) est un échange entre l'expert en traçabilité et le client pour définir l'aspect et l'organisation de la structure du nouveau modèle de données. Ensuite, une activité de spécification des nouveaux tableaux de bord est amorcée (activité 6.5) entre l'expert en traçabilité et le client. L'objectif de cette activité est de définir ensemble les tableaux de bord de suivi de l'impact environnemental désirés par le client (suivi de l'empreinte carbone des fournisseurs, évolution de la consommation d'eau de ses sites de production, suivi des analyses bactériologiques des rejets...). Cette activité peut ainsi être l'occasion de définir les indicateurs de performance environnementale à surveiller et de les matérialiser sur les tableaux de bord. Une fois que les documents de spécification ont été rédigés par l'expert, le client se charge de réviser ces documents (activité 6.6). Une fois cette révision terminée, l'expert en traçabilité va communiquer les documents de spécification à l'équipe technique qui va prendre le relais. Dans un premier temps, l'équipe technique va s'occuper d'intégrer les nouvelles fonctionnalités à la plateforme et de mettre à jour les tableaux de bord (activité 6.7). Elle va alors réaliser une série de tests d'intégration et rédiger une documentation technique de référence (activité 6.8). Pour finir la mise en production, l'équipe va réaliser une phase de recette puis opérer le lancement de la nouvelle plateforme avec l'ajout de fonctionnalités (activité 6.9). Bien entendu, il faudra réaliser cette étape de sorte à minimiser l'interruption de service et le temps de maintenance de la plateforme déjà opérationnelle. Une fois ce nouveau modèle de données et ces nouveaux tableaux de bord intégrés, il ne restera plus qu'à réaliser l'interfaçage avec le logiciel de calcul ACV dans le processus 7 afin de pouvoir exploiter ces nouvelles données enregistrées sur la plateforme blockchain pour le calcul d'impact environnemental de produits.

5.6.7 Processus d'interfaçage de la plateforme blockchain avec le logiciel ACV

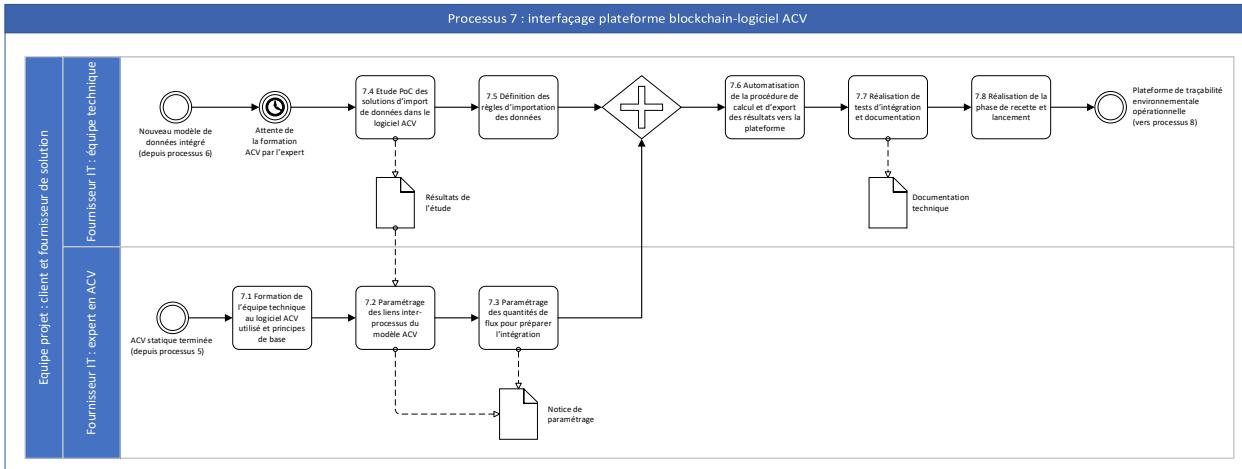


Figure 5.9 : Processus 2.7, interfaçage plateforme blockchain-logiciel ACV

L'objectif de ce processus est de faire un lien entre un logiciel de calcul ACV qui contient les bases de données ACV, le modèle ACV et les méthodes de caractérisation avec la plateforme de traçabilité qui contient les données de production brutes. Ainsi, à la fin de ce processus, il faudra aboutir à un système dans lequel les données de traçabilité blockchain sont automatiquement exportées vers un logiciel qui réalise le calcul d'impact à partir du modèle ACV et de la méthode de caractérisation choisie. Les résultats de calcul alors obtenus par le logiciel devront être exportés vers la plateforme de traçabilité sous la forme d'une trace d'impact. Cette trace sera alors associée à la trace d'un lot de produit grâce au numéro d'identification du lot et permettra d'alimenter les différents tableaux de bord spécifiés. Il est à noter que, contrairement aux processus précédents qui ont été testés et proviennent de référentiels reconnus, les processus 7 et 8 sont beaucoup plus expérimentaux et donc moins robustes. N'ayant pu être testés, ces processus proposent une approche macro de la manière d'intégrer ACV et blockchain et constituent des recommandations qui pourraient être amenées à évoluer en poursuivant la recherche. Un travail de recherche complémentaire sur l'intégration technique des logiciels ACV avec des plateformes blockchain devra donc être effectué pour rendre la méthodologie complètement opérationnelle. Ce processus est exécutable uniquement si deux points d'entrée sont vérifiés :

- La phase d'ACV statique a été terminée lors du processus 5; et
- Le nouveau modèle de données élargi a été intégré et le processus 6 est achevé.

Si ces deux conditions sont satisfaites, l'expert en ACV se charge de réaliser une formation à l'équipe technique sur les principes de base des études ACV et le fonctionnement des logiciels ACV utilisés (activité 7.1). Cette étape est primordiale pour que l'équipe technique comprenne bien la philosophie ACV et puisse imaginer une manière d'échanger les données entre la plateforme de traçabilité et le logiciel de calcul d'impact. Dans le cadre de cette méthodologie, le manque d'expérience sur ces formations ne nous permet pas d'affirmer le temps nécessaire pour la réalisation de celles-ci. Une fois la formation assurée, l'expert ACV devra se charger d'adapter son modèle ACV pour le rendre plus modulaire et standardisé, et prêt à être alimenté en données de traçabilité parfois partielles ou incomplètes (activité 7.2). Par exemple, supposons que les matières premières d'un produit puissent venir d'une usine au Mexique ou d'une usine en Chine en avion ou en bateau et que chaque lot de produit peut avoir subi un processus de transformation optionnel B en plus du processus standard A. Il faudra établir un modèle ACV standardisé capable de modéliser les différents produits ci-dessous :

Tableau 5.2 : Exemples de lots de produits pour la modélisation ACV

N° Produit	Provenance	Processus de transformation	Moyen de transport
Produit 1	100% Chine	Processus A+B	Bateau
Produit 2	100% Mexique	Processus A	Avion
Produit 3	100% Chine	Processus A	Avion
Produit 4	80% Mexique, 20% Chine	Processus A+B	Bateau
Produit 5	30% Chine, 70% Mexique	Processus B	Avion

Comme il ne sera pas question de construire un modèle ACV pour chaque possibilité, l'expert ACV identifiera les sources de variabilité possibles pour les différents lots de produits et définira par exemple des paramètres binaires qui prendront la valeur 0 ou 1 pour chaque source de variabilité. Si les données de traçabilité importées relatives à un lot sont les suivantes : *Lot 158962; 80% Mexique – 20% Chine; Processus A+B; Bateau*, alors le paramétrage ACV devra être le suivant : *Mexique=0.8 – Chine=0.2 – Processus A=1 – Processus B=1 – Bateau=1 – Avion=0*. En affectant

une valeur nulle au transport par avion, le modèle ACV prendra bien en compte le transport par avion dans l’arbre des processus, mais lui affectera une valeur d’impact artificiellement égale à 0. Tout le sens de l’activité 7.2 est donc de préparer ce paramétrage pour que le modèle ACV puisse fournir un calcul représentatif de chaque lot de produit possible sans être modifié manuellement à chaque fois. Une fois cette activité réalisée, l’expert ACV se charge de paramétrer les quantités de flux et de définir les règles d’import (activité 7.3). En effet, il doit définir des règles pour faire le lien entre les quantités d’intrants et d’extrants des processus élémentaires de son modèle ACV et les données de traçabilité importées depuis la plateforme de traçabilité. La commande Python, notamment disponible dans OpenLCA par exemple, pourrait être un outil intéressant. Des lignes de programme pourraient être écrites pour affecter les quantités de traçabilité aux bons intrants et extrants des différents processus élémentaires. En parallèle des activités 7.2 et 7.3, l’équipe technique peut également réaliser une étude PoC pour identifier les meilleures solutions d’import et d’affectation de données automatique dans les logiciels ACV (activité 7.4). Le résultat de l’étude pourrait alors être communiqué à l’expert ACV pour l’aider dans la réalisation des activités 7.2 et 7.3. Une fois cette étude terminée, l’équipe technique pourrait alors standardiser les règles d’importation des données (langage utilisé, code développé, format d’import...) (activité 7.5). Ces règles d’importation pourront alors être testées et la procédure inverse d’export des résultats d’ACV depuis le logiciel ACV vers la plateforme devra également être étudiée (activité 7.6). Une fois que toutes les règles d’import et d’export de données ont été définies, l’équipe technique s’occupera de réaliser les tests d’intégration et de rédiger une documentation technique (activité 7.7). Enfin, elle pourra réaliser la phase de recette et le lancement du système ACV-blockchain (activité 7.8). En sortie de ce processus, la plateforme de traçabilité environnementale est donc pleinement opérationnelle.

5.6.8 Processus de calcul dynamique des chaînes de traçabilité

Une fois que la plateforme est opérationnelle à la suite de la réalisation du sous-processus 7, l’objectif de ce sous-processus est de montrer comment le système ACV-blockchain permet d’automatiquement calculer une trace d’impact environnemental à partir d’une chaîne de traçabilité d’un lot disponible dans la plateforme blockchain. Bien entendu, ce processus système dépend des

choix d'interfaçage et d'import/export de données qui ont été effectués dans le cadre du processus 7.

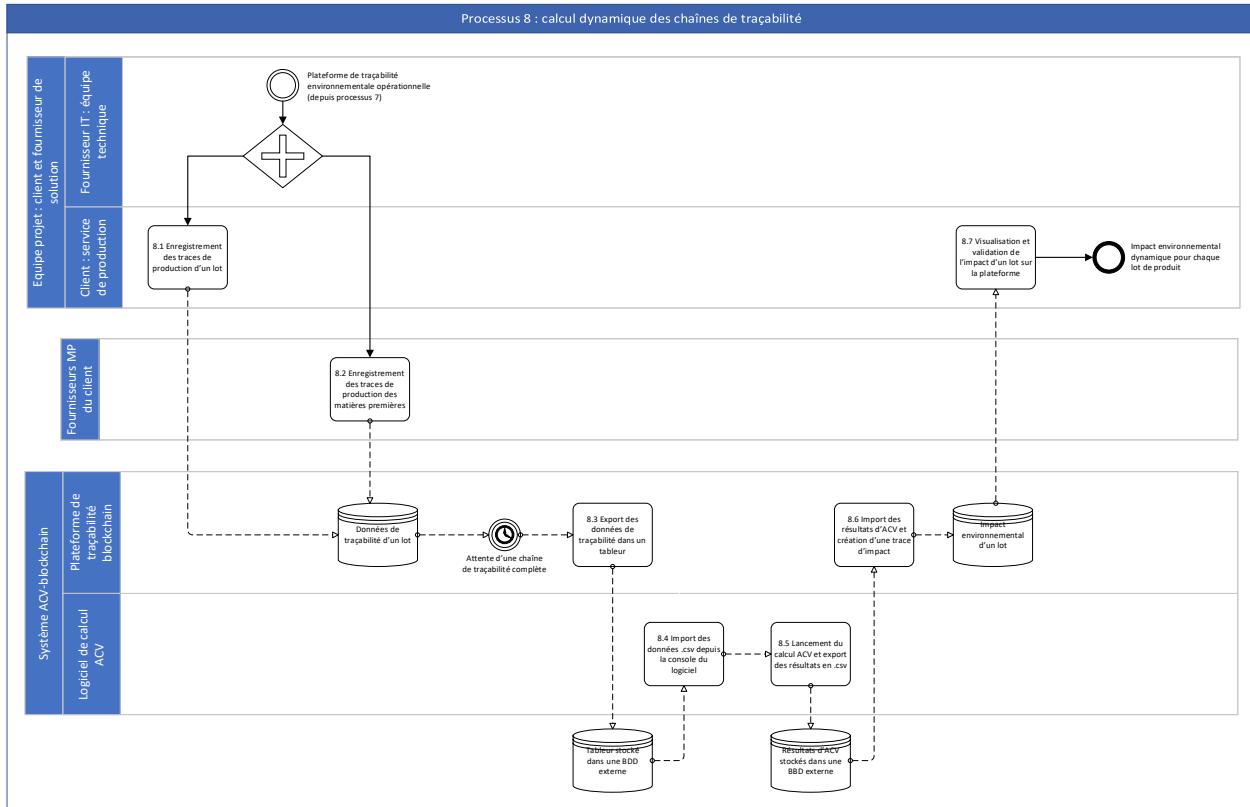


Figure 5.10 : Processus 2.8, calcul dynamique des chaînes de traçabilité

CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION

Cette section présente le projet pilote réalisé avec Chargeurs Luxury Materials (CLM) dont le but était d'expérimenter la méthodologie développée dans le cadre de ce projet de recherche. Dans un premier temps, les objectifs et le périmètre de ce projet d'expérimentation seront déterminés. Ensuite, l'étude ACV menée sera détaillée puis les résultats de cette étude seront présentés et mis en perspectives avec les limites de l'étude.

6.1 Définition des objectifs et du périmètre du projet pilote

Dans cette première partie du projet, l'idée a été de suivre les processus 1 et 2 de la méthodologie d'implantation développée. Le processus 1 correspond à la planification et le lancement du projet. Le produit à étudier a été défini avec CLM ainsi que les objectifs du projet pilote et les différentes attentes des parties prenantes. Cependant, aucun contrat n'a été signé puisqu'il s'agissait simplement d'un projet expérimental. Le processus 2 a ensuite été appliqué afin de définir le périmètre exact du projet et d'aboutir à une bonne compréhension des processus d'affaires de CLM et ainsi à une modélisation complète des processus d'affaires sur le périmètre étudié.

6.1.1 Objectifs du projet et limites

Les objectifs généraux de ce projet pilote ont été présentés en partie 4.3 de ce mémoire. Pour rappel, l'apport principal de ce projet du point de vue de la recherche a été d'expérimenter une partie de la méthodologie d'implantation développée. Son objectif était ainsi de mettre en évidence et de quantifier l'apport des données de traçabilité blockchain sur l'impact environnemental de lots de produits réels, sans pour autant aller jusqu'à l'implémentation complète du système ACV-blockchain et l'automatisation du calcul d'impact. Ce projet a donc pu expérimenter l'opérationnalisation des processus 1 à 5 de la méthodologie développée et d'apporter une réponse sur la valeur quantifiée des données de traçabilité pour l'amélioration du calcul ACV. Le périmètre d'un futur projet de recherche pourrait ainsi être d'expérimenter la mise en place de l'automatisation du système ACV-blockchain opéré dans les processus 6 à 8.

6.1.2 Périmètre et organisation des activités

Concernant le périmètre du projet, il faut tout d'abord avoir une bonne connaissance de l'organisation de la chaîne de valeur d'une filière textile. Une représentation macro des différentes étapes de cette chaîne de valeur, inspirée d'Henry et al. (2015), est présentée en figure ci-dessous.

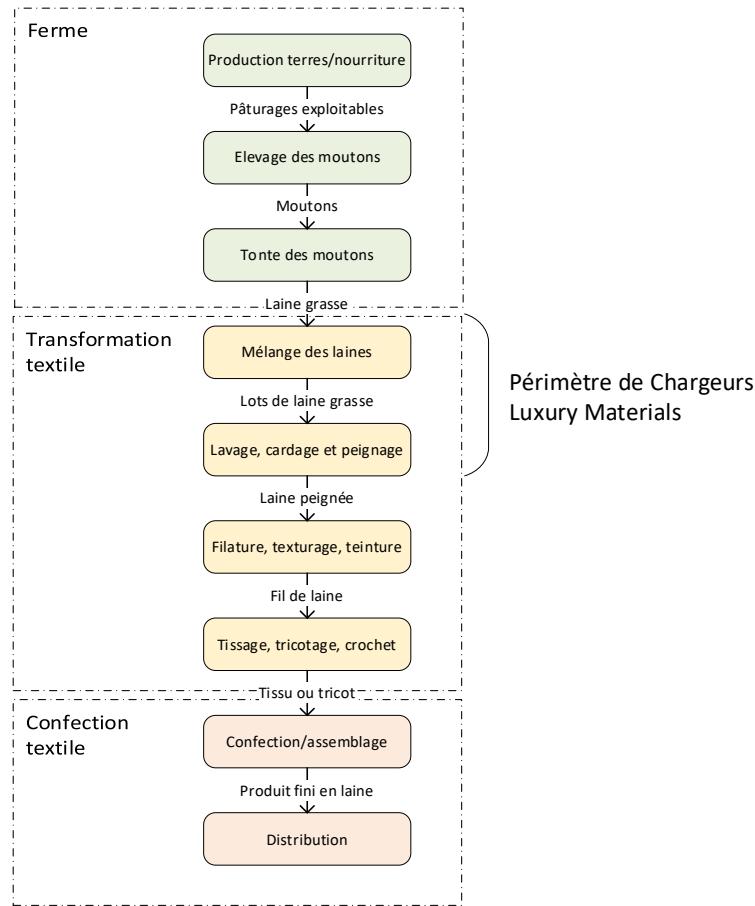


Figure 6.1 : Présentation de la chaîne de valeur générale d'un produit en laine

CLM opère entre la production de laine grasse par les fermiers et la filature de la laine par le filateur. Le groupe se charge donc de sourcer sa laine auprès de différents fermiers à travers le monde, d'effectuer le tri et le mélange de la laine, le lavage des lots de laine, le cardage, le peignage puis l'emballage des lots avant expédition chez le filateur. Dans le cadre de ce projet, nous allons donc effectuer le calcul d'impact de l'ensemble de ces activités ainsi que des activités d'élevage des moutons à la ferme. Le fait d'inclure les activités d'élevage est un facteur accru de complexité puisque les données de production des fermes appartiennent à des fournisseurs extérieurs au groupe Chargeurs et sont donc beaucoup moins accessibles que les données des sites de production possédés par le groupe.

En se basant sur les documents de description des processus fournis par Chargeurs, nous avons pu définir plus précisément le séquencement des opérations de transformation de la laine sur leur chaîne de valeur. Il faut tout d'abord savoir que Chargeurs est un groupe international qui possède plusieurs usines de peignage à travers le monde (en Chine, aux États-Unis, en Uruguay et en Argentine). Chaque usine de peignage (nommée « *Combing Mill* ») s'occupe des étapes de tri, de mélange, de peignage, de cardage et d'emballage des lots de laine avant stockage ou expédition vers le filateur. Ces usines transforment la laine qui provient des différentes fermes fournissant Chargeurs à travers le monde, avec une logique de proximité géographique. Ainsi, l'usine de Chine transforme majoritairement la laine issue des fermes en Australie et en Nouvelle-Zélande et l'usine d'Argentine transforme principalement les laines des fermes patagoniennes. Pour le projet pilote, nous avons choisi de travailler sur les lots transformés par l'usine de peignage en Chine et issus de fermes d'Australie et de Nouvelle-Zélande. Cela est dû au fait que les données de l'usine de Chine étaient plus rapidement accessibles et que Chargeurs avait un intérêt particulier pour la modélisation de l'impact de ses fournisseurs d'Australie et de Nouvelle-Zélande. Le suivi du processus 2 de la méthodologie présentée en chapitre 5 (figure 5.4) a alors permis de définir une première modélisation du processus d'affaires des lots de laine peignée transformés en Chine par Chargeurs (voir figure ci-dessous).

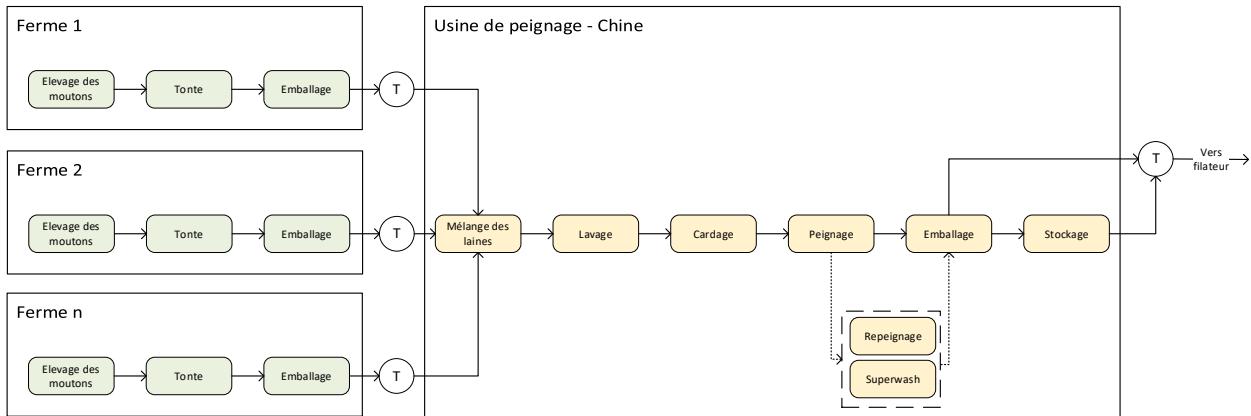


Figure 6.2 : Modélisation des processus de transformation de la laine par Chargeurs en Chine avant filature

Une première activité de tri et de mélange de la laine est opérée par Chargeurs. Cette étape a pour but de mélanger dans un même lot des laines provenant de différentes fermes et donc de différentes finesse (mesurée en microns). En effet, les clients de Chargeurs requièrent des lots de laine d'une finesse précise, qui n'est pas toujours disponible. Ces mélanges permettent donc d'obtenir une laine

de finesse moyenne équivalente aux exigences du client en mélangeant différentes finesses dans les proportions adéquates. Chaque lot de laine est ainsi unique dans sa composition et la provenance des laines qui le composent. Ensuite, le lavage de la laine grasse permet de la débarrasser de la plupart des impuretés (résidus organiques, lanoline) à l'aide d'un puissant détergent. La laine propre est alors cardée. Cette étape compacte les fibres courtes pour créer des fibres plus allongées et résistantes. Des peignes mécaniques viennent retirer les fibres les plus courtes. Ensuite, la laine subit une étape de peignage qui permet d'aligner les fibres dans le sens de la longueur grâce à des peignes mécaniques. Une fois le peignage terminé, 2 processus optionnels peuvent être suivis : le re-peignage de la laine, lorsque la qualité demandée par le client est très élevée, et le traitement « superwash ». Ce dernier est un traitement chimique qui permet de traiter la laine afin de la rendre plus résistante au lavage en machine lors de son utilisation future. Une fois les étapes de première transformation terminées, la laine peignée est compactée en ballots et emballée. Elle peut alors être stockée en attente d'expédition ou directement expédiée chez le filateur.

6.2 Étude ACV de la laine peignée produite par Chargeurs

Dans la seconde partie de ce projet, une fois que le contexte industriel était bien assimilé et qu'une modélisation des processus d'affaires était prête, nous avons alors pu continuer à suivre la méthodologie d'implantation développée avec la réalisation des processus 3, 4 et 5. Le processus 3 a permis un premier cadrage de l'ACV à réaliser sur les lots de laine peignée ainsi que d'obtenir les résultats d'une première étude générique. Les résultats de cette étude générique ont pu être comparés à différentes études scientifiques sur l'impact environnemental de produits en laine et au guide des bonnes pratiques pour l'ACV de produits en laine développé par l'IWTO. Ensuite, le suivi du processus 4 a permis d'identifier et de collecter les données clés de production de l'usine de peignage de Chargeurs en Chine de manière efficace. Enfin, le processus 5 a permis de construire un modèle ACV robuste et prenant en compte l'ensemble des chemins possibles des lots de laine transformés par l'usine de peignage en Chine.

6.2.1 Cadrage de l'étude ACV et première étude générique

L'objectif de l'étude ACV qui sera réalisée dans le cadre de ce projet pilote est pour le partenaire industriel CLM de pouvoir visualiser l'impact environnemental des différents lots de laine peignée qu'il produit en fonction notamment de leur provenance et de leur parcours de transformation.

Cette mesure d'impact n'a pas vocation à être communiquée largement aux clients de CLM pour le moment et concerne donc un public interne. L'application envisagée de cette étude est multiple : être capable de proposer une mesure d'impact par lot en cas de demande d'un client, piloter la stratégie durable de l'entreprise et identifier les fournisseurs les plus émetteurs.

Les frontières du système de produit ACV sont telles que définies dans le modèle de processus d'affaires ci-dessus. Initialement, les frontières du système portaient uniquement sur la modélisation de 2 fermes en Australie et de l'ensemble des processus de l'usine de peignage chinoise de CLM. Cependant, nous verrons par la suite que les problèmes de collecte de données nous ont amené à modifier la modélisation au niveau des fermes. L'unité fonctionnelle du produit a été définie comme « 1kg de laine peignée et emballée par l'usine de peignage CLM en Chine prête à l'expédition vers le filateur », en accord avec les recommandations du projet LEAP mené par la FAO en 2015. De nombreuses multifonctionnalités ont également dû être considérées au niveau de l'étape de première transformation. Une allocation économique a par exemple été faite pour la lanoline extraite lors du lavage de la laine grasse, car elle est ensuite majoritairement revendue à l'industrie cosmétique pour une utilisation dans les produits de beauté. La blousse de laine (en anglais « wool noils »), qui correspond aux fibres trop courtes pour être cardées, a également subi une allocation économique car elle est majoritairement revendue. Ces deux allocations économiques ont été faites selon les valeurs du manuel d'ACV des produits textiles de Subramanian S. Muthu (2015).

Ensuite, conformément à l'activité 3.2 du processus 3 de la méthodologie, le choix des indicateurs d'impact et de la méthode de caractérisation de l'impact a été effectué. Pour déterminer les indicateurs d'impact à évaluer, nous nous sommes une fois de plus basés sur les recommandations du manuel ACV de l'IWTO pour les produits en laine. Pour choisir la méthode de caractérisation adéquate pour chaque catégorie d'impact, nous nous sommes basés sur la grille d'évaluation comparative des méthodes d'EICV de l'étude menée par Nicolas Thériault (2011). Cette grille d'évaluation attribue un nombre de points à 6 méthodes de caractérisation principales (ReCiPe, CML2002, EDIP 2003, USEtox, TRACI et LUCAS) en fonction de la réponse d'un panel d'experts à différents critères d'évaluation. Dans le tableau ci-dessous, les différentes catégories d'impact recommandées par l'IWTO pour les produits en laine sont répertoriées en colonne 1, les 3 méthodes de caractérisation avec les scores les plus élevés pour chaque catégorie d'impact en colonne 2. Les

colonnes 3 et 4 indiquent si les catégories d'impact concernent la phase d'élevage des moutons à la ferme ou bien de première transformation textile à l'usine de peignage.

Tableau 6.1 : Choix des catégories d'impact et des méthodes de caractérisation pour l'étude ACV

Indicateurs	Méthode de caractérisation conseillée	Ferme	1^{ère} transformation
Changement climatique	ReCiPe/CML2002/TRACI	X	X
Consommation d'eau	ReCiPe	X	X
Occupation des terres	ReCiPe/TRACI/LUCAS	X	
Consommation des ressources naturelles	ReCiPe/CML2002/EDIP2003	X	X
Eutrophisation	ReCiPe/LUCAS/TRACI	X	X
Particules fines	Non évalué	X	X
Acidification terrestre	CML2002/ReCiPe/LUCAS		X
Formation de smog photochimique	ReCiPe/LUCAS/TRACI		X
Déplétion de la couche d'ozone	CML2002/TRACI/ReCiPe		X
Toxicité humaine	USEtox/ReCiPe/TRACI		X
Écotoxicité aquatique	USETox/ReCiPe/CML2002		X

Comme on peut le constater dans le tableau ci-dessus, la méthode de caractérisation ReCiPe couvre l'ensemble des catégories d'impact recommandées par l'IWTO pour la réalisation d'études ACV de produits en laine et est recommandée pour toutes ces catégories d'après la grille d'évaluation. De plus, ReCiPe couvre à la fois les indicateurs orientés problèmes et dommages tout en permettant une agrégation en score unique. Il s'agit également de l'une des méthodes les plus utilisées

présentement. C'est donc de la méthode de caractérisation d'impact qui sera retenue pour la suite de ce projet pilote. Elle sera utilisée sous sa version ReCiPe endpoint 2016 (H, A). La perspective hiérarchique de cette version est basée sur un consensus scientifique considérant un horizon temporel moyen des impacts et une plausibilité moyenne des mécanismes d'impact (Huijbregts et al., 2016). En calculant avec la méthode de caractérisation ReCiPe2016 endpoint hiérarchique, on obtient une liste de 18 indicateurs regroupés dans 3 catégories de dommages endpoint : Ecosystem Quality (EQ), Human Health (HH) et Resources (R). Ces indicateurs sont tous exprimés en points et peuvent être comparés à l'intérieur d'une même catégorie d'impact. Voyons comment la normalisation et la pondération sont opérées dans ReCiPe 2016 pour ensuite mieux comprendre comment exploiter les résultats sans faire d'erreur.

Tout d'abord, chaque catégorie d'impact midpoint est calculée dans une unité qui lui est propre (le changement climatique est exprimé en CO₂eq, la déplétion de la couche d'ozone en CFC-11eq) à partir de facteurs de caractérisation midpoint qui font le lien entre les substances élémentaires émises et leurs impacts pour chaque catégorie midpoint. Ces 18 indicateurs peuvent ensuite être agrégés dans 3 catégories endpoint (HH, EQ et R) à partir de facteurs de caractérisation et selon les chemins de dommages du schéma présenté en Annexe B :

- Pour la catégorie HH, on évalue les dommages en DALY, c'est à dire le nombre d'années perdues ou la période d'invalidité entraînée par une maladie ou un accident;
- Pour la catégorie EQ, on évalue les dommages en intégrant la perte d'espèces locale au cours du temps, l'unité étant des espèces.années; et
- Pour la catégorie R, on évalue les dommages en estimant le surcoût en dollars de l'extraction future de ressources fossiles et minérales.

Une normalisation externe est ensuite appliquée à un référentiel mondial (référentiel ReCiPe Midpoint Hierarchist World 2000) pour évaluer l'impact relativement à l'impact moyen d'une personne dans le monde sur une année, et ce pour chaque catégorie d'impact. Une fois la normalisation faite, une pondération est appliquée en fonction du modèle des limites planétaires : dans la version hiérarchiste, un coefficient de 400 est appliqué à EQ, 300 à HH et 300 à R, soit un total de 1000. C'est à la suite de ces 2 étapes de normalisation puis de pondération que les résultats sont obtenus en points dans la méthode ReCiPe Endpoint 2016 (H, A).

Prenons un exemple d'un passage du midpoint au endpoint pour mieux comprendre : à la suite d'une étude ACV, supposons que l'on obtient un impact sur le changement climatique $CC_{midpoint} = 50\text{kgCO}_2\text{eq}$ pour un produit avec la caractérisation par ReCiPe midpoint 2016 (H). On utilise alors le facteur de conversion $C_f = 6.89E + 03 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{personne.année})$ fourni par la table de conversion de la méthodologie ReCiPe pour obtenir cette valeur normalisée en personne.année. On obtient donc un impact normalisé $CC_{normalisé} = \frac{CC_{midpoint}}{C_f} = 7.25E - 03 \text{ personne.année}$. Pour trouver le nombre de points pondérés en endpoint, comme on sait que le changement climatique contribue à la fois aux catégories HH et à EQ dans le modèle ReCiPe, il nous reste à multiplier par les facteurs de pondération de chaque catégorie. On obtient donc les caractérisations endpoint suivantes :

$$CC_{endpoint,HH} = CC_{normalisé} * Coef_{HH} = 7.25E - 03 * 300 = 2.18 \text{ points}$$

$$CC_{endpoint,EQ} = CC_{normalisé} * Coef_{EQ} = 7.25E - 03 * 400 = 2.9 \text{ points}$$

Une fois l'ensemble des éléments de cadrage de l'ACV déterminés, le système de produit comportant l'ensemble des processus élémentaires du modèle ainsi que l'ensemble des intrants et des extrants de chaque processus a été construit. Ce système de produit est disponible en Annexe C de ce mémoire. La construction du modèle ACV générique a ensuite été basée sur la structure de ce système de produit et à partir de diverses sources de données :

- Pour le processus d'élevage des moutons, les données d'inventaire d'une étude ACV de produits textiles réalisée par Cardoso pour l'Université de Porto (2013) ont été utilisées, dans le cadre d'un élevage de moutons conventionnel. Le processus a été remodelé pour supprimer les intrants et extrants qui n'ont pas été définis dans le système de produit construit avec CLM et pour adapter notamment les intrants d'énergie de manière locale, avec l'hypothèse que la ferme est localisée en Nouvelle-Zélande;
- Pour le transport, les processus par défaut d'Ecoinvent pour le transport terrestre et le transport maritime ont été utilisés. Les données en t.km ont été estimées pour 1kg de laine grasse à partir d'une évaluation des distances entre les fermes (en Nouvelle-Zélande et en Australie) et l'usine de peignage en Chine obtenue par un calculateur de distances; et

- Pour le processus de première transformation de la laine, les données de base de l'étude ACV menée par Wiedemann et al. (2020) sur un vêtement en laine ainsi que celles de l'étude de Cardoso (2013) ont été croisées et les intrants/extrants sélectionnés en fonction du système de produit défini conjointement avec CLM. Nous ne nous attarderons pas ici sur le détail de la construction de cette étude générique ni sur ses résultats précis puisque son seul objectif a été d'identifier les sources d'impact prépondérantes sur la chaîne de valeur d'un produit standard de laine peignée afin d'améliorer la finesse de la collecte de données. Cette première étude générique est donc assez éloignée et avec une grande incertitude sur la représentativité de la filière laine de CLM.

Une fois le modèle ACV générique construit, les résultats d'impact obtenus par la méthode ReCiPe endpoint 2016 (H, A) ont pu être exploités. Le tableau suivant répertorie le pourcentage de contribution de chacune des catégories d'impact recommandées au score unique en points obtenu pour 1kg de laine peignée.

Tableau 6.2 : Contribution des catégories d'impact recommandées au score unique obtenu par ReCiPe endpoint 2016 (H, A).

Catégories d'impact	Contribution au score unique (%)	Catégories d'impact	Contribution au score unique (%)	Catégories d'impact	Contribution au score unique (%)
Changement climatique	60%	Eutrophisation	<0.1%	Déplétion de la couche d'ozone	<0.1%
Consommation d'eau	5%	Particules fines	25%	Toxicité humaine	4.5%
Occupation des terres	0.25%	Acidification terrestre	0.5%	Écotoxicité aquatique	<0.1%
Consommation des ressources naturelles	5%	Formation de smog photochimique	<0.1%		

Cela permet immédiatement de visualiser les catégories d'impact prépondérantes. Dans la suite de cette étude, on s'attend donc principalement à devoir suivre avec attention l'impact sur le changement climatique et les particules fines ainsi que l'impact sur la consommation d'eau et de ressources, sur la toxicité humaine et l'acidification terrestre. Les catégories d'impact contribuant à moins de 0.1% au score unique (l'eutrophisation, la formation de smog photochimique, la déplétion de la couche d'ozone et l'écotoxicité aquatique) ont quant à elles été écartées pour la suite de l'étude. Il est important de noter que ce choix des catégories d'impact est tout à fait arbitraire et correspond en réalité au besoin de réduire le nombre de ces catégories pour rendre les résultats d'impact plus lisibles par la suite. Évidemment, il pourrait être argumenté que l'exclusion de certaines catégories sur une contribution au score unique est discutable, étant donné la forte subjectivité de ces scores en point basés sur des normalisations externes. Cependant, la vocation de l'ACV réalisée dans cette expérimentation n'est pas d'obtenir une image exhaustive de l'impact des lots de laine mais plutôt de présenter simplement l'échelle de variation d'impacts que l'on peut attendre en exploitant les données de traçabilité.

Pour évaluer les points importants de la collecte de données, visualisons l'arbre de contribution de chaque processus et de chaque flux aux catégories d'impact principales conservées pour l'étude. Le tableau suivant répertorie les 3 sources principales à l'origine de l'impact dans ces catégories.

Tableau 6.3 : Sources principales d'impact pour chacune des principales catégories identifiées

Catégories d'impact	Sources principales d'impact et proportion intra-catégorie
Changement climatique	Émissions directes au champ de méthane et de protoxyde d'azote (90%) Production et distribution d'électricité à l'usine de peignage (5%) Production de produits phosphatés (2.5%)
Particules fines	Émissions directes au champ d'ammoniac (88%) Production de produits phosphatés (4%) Production et distribution d'électricité à l'usine de peignage (3%)
Consommation d'eau	Eau consommée par les moutons pendant l'élevage (65%) Eau consommée pour le lavage de la laine (29%) Eau consommée pour l'irrigation à la ferme (3.5%)

Tableau 6.3 : Sources principales d'impact pour chacune des principales catégories identifiées (suite et fin)

Consommation des ressources fossiles et minérales	Production et distribution d'électricité à l'usine de peignage (32%) Production de produits phosphatés (25%) Construction des machines agricoles (22%)
Toxicité humaine	Émission au sol de cadmium à la ferme (70%) Production de produits phosphatés (9%) Production et distribution d'électricité à l'usine de peignage (4%)
Acidification terrestre	Émissions directes au champ d'ammoniac (95%) Production de produits phosphatés (2.1%) Production et distribution d'électricité à l'usine de peignage (2%)

Cette étude ACV générique nous a donc permis de déterminer les points sur lesquels focaliser la collecte de données auprès de CLM par la suite. La visualisation de l'arbre des processus indiquait une contribution de 90% du processus d'élevage au score d'impact total en points, de 8.5% pour la première transformation à l'usine de peignage et de 1.5% pour le transport entre la ferme et l'usine. La précision des résultats de l'étude dépendra donc de la capacité à collecter des informations primaires du processus d'élevage. Il faudra ainsi obtenir des données précises sur les émissions des moutons et donc sur leur alimentation, sur leur consommation d'eau, sur les types de produits chimiques agricoles utilisés et leur quantité, les types de machines agricoles utilisées et leur distance parcourue chaque année et sur la présence ou non de circuits d'irrigation. Pour l'usine de peignage, il faudra être capable de connaître très précisément le volume d'eau utilisé pour le lavage de la laine ainsi que la quantité d'électricité consommée, le fournisseur d'électricité et le mix énergétique de production d'électricité.

6.2.2 Identification des données clés de production et collecte des données

À partir des informations tirées de la première étude ACV générique, une liste complète des données à collecter au niveau de la ferme et de l'usine de peignage a pu être établie. À partir de l'étude des chaînes de traçabilité de la plateforme développée par Crystalchain pour CLM, nous avons également pu identifier parmi les données à collecter celles qui étaient déjà renseignées sur la plateforme. L'ensemble des données nécessaires au calcul ACV et leur niveau de disponibilité

sont détaillés dans le tableau présenté en Annexe D. Le code couleur de la disponibilité des données sur la plateforme blockchain (dernière colonne du tableau) est le suivant :

- En vert, les données déjà disponibles sur la plateforme de traçabilité blockchain de CLM;
- En jaune, les données qui ne sont pas enregistrées sur la plateforme de traçabilité de CLM, mais qui sont enregistrées sur les plateformes d'autres clients de Crystalchain. Leur intégration est donc simple, car éprouvée; et
- En orange, les données qui n'ont jamais été enregistrées sur une plateforme développée par Crystalchain, mais qui pourraient l'être dans le cadre d'une extension du modèle de données de traçabilité.

Cette liste de données a été communiquée à CLM qui a rapidement renvoyé les données complètes de son usine de peignage en Chine. Cependant, il y a eu un blocage de la collecte de données au niveau des fermes, qui ne disposaient pas pour la plupart des données requises. Après discussion avec CLM, nous avons jugé que les données relatives à l'activité des fermes selon la précision demandée ne pourraient être disponibles dans le cadre temporel de ce projet d'études, car la connaissance actuelle des fermiers sur leurs émissions et leurs consommations n'était pas suffisante. Cette impossibilité d'obtenir les données des fermes constitue la limite principale de ce projet d'expérimentation, d'autant plus après que nous avons identifié le processus d'élevage des moutons comme prépondérant sur l'impact final de la laine peignée. Afin de contourner néanmoins ce problème d'accès aux données, nous avons décidé de construire des processus proxys représentatifs de la diversité des fermes fournissant Chargeurs à partir de cas d'études de la

Ferme 1 : agriculture conventionnelle moyenne	Ferme 2 : agriculture conventionnelle intensive	Ferme 3 : agriculture biologique extensive
Localisation : Nouvelle-Zélande Densité : 1.2 mouton/ha Masse de laine : 67t/an	Localisation : Australie Densité : 12 mouton/ha Masse de laine : 47.5t/an	Localisation : Australie Densité : 0.1 mouton/ha Masse de laine : 28.5t/an
Energie utilisée par mouton : faible Eau utilisée par mouton : faible	Energie utilisée par mouton : moyen Eau utilisée par mouton : moyen	Energie utilisée par mouton : élevé Eau utilisée par mouton : élevé
Fertilisants utilisés : faible Pesticides utilisés : non Traitements chimiques utilisés : faible	Fertilisants utilisés : élevé Pesticides utilisés : moyen Traitements chimiques utilisés : moyen	Fertilisants utilisés : non Pesticides utilisés : non Traitements chimiques utilisés : non

Figure 6.3 : Classification des fermes en 3 catégories pour l'étude ACV

littérature scientifique. En attendant que la collecte de données spécifiques des fermes soit possible, nous avons donc décidé d'évaluer comment classifier les fermes en plusieurs groupes génériques et d'affecter chacune de ces fermes à un groupe.

Pour déterminer ces groupes de classification, nous avons utilisé les résultats d'une étude ACV de produits textiles de Cardoso pour l'université de Porto (2013). Cette étude propose un inventaire complet de 3 types de fermes de caractéristiques assez différentes, situées en Australie et en Nouvelle-Zélande, comme c'est le cas pour notre projet pilote. Ces 3 fermes témoins couvrent bien la typologie de l'ensemble des fournisseurs de CLM en Australie et en Nouvelle-Zélande, comme nous l'ont confirmé les équipes de CLM avec lesquelles nous avons travaillé sur le projet. La figure précédente présente les principales caractéristiques de ces 3 fermes et des 3 groupes proxy qu'elles constituent.

Les données de Cardoso pour ces 3 groupes seront alors combinées avec les données obtenues de la part de l'usine de peignage de CLM en Chine pour la réalisation de l'ACV du berceau à la porte. L'ensemble de ces données ont ensuite été regroupées dans un tableur unique et mises à l'échelle.

6.2.3 Réalisation de l'étude ACV d'évaluation

Pour commencer, l'ensemble des processus du modèle ACV ont été construits en suivant les recommandations de la méthodologie développée en fonction des données qui étaient disponibles. L'ensemble des processus créés est répertorié dans le tableau ci-dessous. La liste des processus d'arrière-plan utilisés issus des bases de données Ecoinvent 3.3 et Agribalyse 3.0 est disponible en Annexe E.

Tableau 6.4 : Processus élémentaires créés pour l'étude ACV

Phase ACV	Nom du processus	Source de données
Ferme	Sheep Breading Farm 1, conventional, NZ	Cardoso, 2013
	Sheep Breading Farm 2, intensive, AU	Cardoso, 2013
	Sheep Breading Farm 3, extensive, AU	Cardoso, 2013
Transport	Transport to Combing Mill from farm 1	Traçabilité Crystalchain Ecoinvent 3.3

Tableau 6.4 : Processus élémentaires créés pour l'étude ACV (suite et fin)

	Transport to Combing Mill from farm 2	Traçabilité Crystalchain Ecoinvent 3.3
	Transport to Combing Mill from farm 3	Traçabilité Crystalchain Ecoinvent 3.3
Usine de peignage	Wool Processing Standard flow	Données CLM Chine
	Wool Processing Recombing	Données CLM Chine
	Wool Processing Superwash	Données CLM Chine
	Wool Blend Composition	Traçabilité Crystalchain
	Wool Processing Group	Traçabilité Crystalchain

Pour une meilleure compréhension, détaillons l'utilité des différents processus utilisés dans la phase de l'usine de peignage. La figure ci-dessous illustre la manière dont les processus sont liés et les paramètres qui existent dans la modélisation.

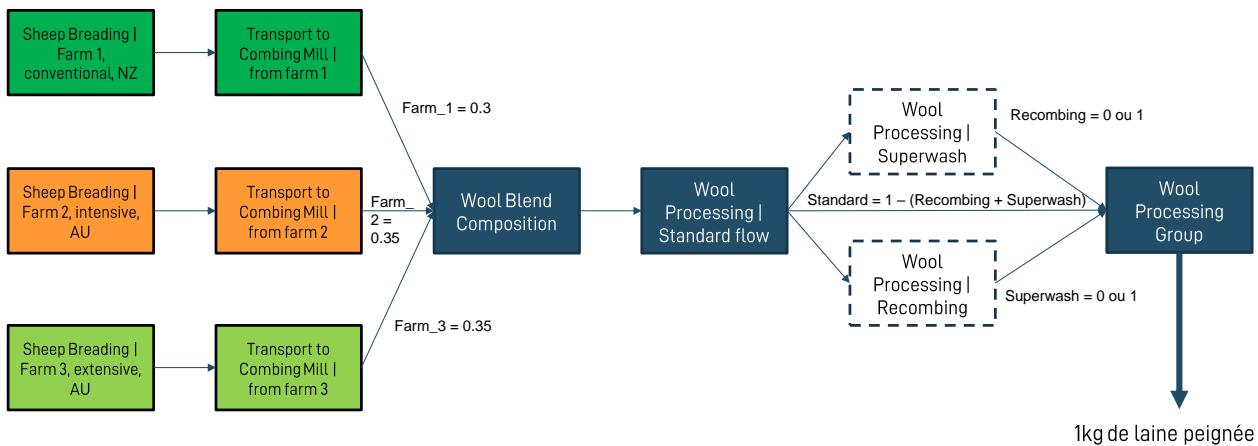


Figure 6.4 : Modélisation ACV de la laine peignée CLM

Le processus « Wool Blend Composition » est utilisé pour paramétriser les origines du mélange de laine en se basant sur les données de traçabilité qui seront issues de la plateforme de Crystalchain. Par exemple, si le lot de laine tracé est un mélange de 30% de laine de la ferme 1, de 35% de la ferme 2 et de 35% de la ferme 3, alors ce processus va paramétriser les intrants des différents

processus de transport depuis les fermes 1, 2 et 3 à 0.3kg, 0.35kg et 0.35kg de laine grasse respectivement et proposer un extrant de 1kg de laine grasse. Le processus « Wool Processing | Standard flow » correspond à l'ensemble des étapes de transformation obligatoires de la laine opérées chez CLM en Chine. Il inclut donc les étapes de lavage, cardage, alignement des fibres, peignage, finissage et pressage. Les processus « Wool Processing | Superwash » et « Wool Processing | Recombing » sont des processus optionnels dans la continuité du flux standard. Ces deux processus optionnels ne peuvent pas être conjointement appliqués sur un même lot de produit, ce qui laisse trois chemins possibles aux différents lots de laine :

- Flux standard + superwash additionnel;
- Flux standard + re-peignage additionnel; et
- Flux standard simple.

Le processus « Wool Processing Group » se charge donc, en fonction des données de traçabilité recueillies pour chaque lot de laine, de choisir le chemin parcouru par ce lot pour le calcul ACV. Il affecte donc binairement 0 ou 1 aux processus additionnels si les informations de traçabilité indiquent qu'un lot de laine particulier a subi l'un de ces processus puis Standard = 1 – (Recombining + Superwash) au flux standard. Il est à noter que les données de consommation de l'usine de peignage de CLM en Chine étaient très bien cloisonnées entre les différents processus ce qui nous a évité une procédure d'allocation complexe.

6.3 Résultats de l'expérimentation

Pour la présentation des résultats ACV, nous avons choisi une normalisation relative plutôt qu'une présentation des valeurs d'impact brutes, et ce afin de conserver la confidentialité des données fournies par le partenaire industriel. Il n'y aura donc par la suite aucune présentation de valeurs en écopoints, en kgCO₂eq ou en toute unité directement quantifiable, mais seulement en pourcentage d'impact relatif en %. L'objectif attendu pour les résultats de cette expérimentation est de montrer l'apport des données de traçabilité pour améliorer la qualité et la représentativité des ACV de produits industriels. Pour mettre cet apport en évidence, nous avons effectué des comparaisons sur plusieurs niveaux :

- Tout d'abord, une comparaison en modifiant artificiellement les compositions des lots de laine (et donc leur provenance) et les processus optionnels suivis (superwash et repeignage). Cela a pour objectif d'évaluer la variabilité de l'impact environnemental des lots en fonction de divers scénarii de composition et de transformation, et donc de déterminer l'importance des données de traçabilité blockchain pour l'amélioration des ACV. En effet, les données de traçabilité permettent d'apporter une information précise sur les pourcentages de composition de chaque lot de laine ainsi que sur les processus de transformation subis. Ainsi, si l'on se rend compte que ces paramètres influent fortement sur l'impact environnemental des lots, la traçabilité sera alors nécessaire pour affecter à chaque lot un impact environnemental discriminant ; et
- Ensuite, une comparaison sous forme d'une analyse de sensibilité entre les résultats obtenus par l'étude ACV générique et par l'étude ACV spécifique avec les données fournies par CLM. Cette comparaison permettra de montrer l'importance de disposer de données hautement spécifiques sur toute la chaîne de valeur d'un produit pour les entreprises afin d'évaluer leur impact réel et de trouver des leviers d'amélioration. Dans ce cadre, la traçabilité blockchain pourra être utile pour disposer facilement de ces données spécifiques sur l'ensemble d'une chaîne de valeur.

La date de production d'un lot est également une information intéressante apportée par la traçabilité blockchain. En fonction de la variabilité des consommations et des émissions annuelles des fermes et des usines, il pourra également y avoir un intérêt à s'appuyer sur la traçabilité pour modéliser l'évolution annuelle des impacts environnementaux des lots de laine.

6.3.1 Comparaison de scénarii sur la composition des lots et les processus optionnels

Pour réaliser cette analyse comparative, plusieurs scénarii de composition de lots variables avec suivi ou non de processus optionnels ont été construits et évalués puis comparés dans les résultats. Les différents scénarii sont présentés dans le tableau ci-dessous en faisant varier les paramètres du modèle ACV.

Tableau 6.5 : Présentation des différents scénarios pour l'analyse ACV selon la composition des lots de laine

N°	Nom	Farm_1	Farm_2	Farm_3	Standard	Recombing	Superwash
1	Mélange de laine	0.33	0.33	0.33	1	0	0
2	Laine conventionnelle	1	0	0	1	0	0
3	Laine intensive	0	1	0	1	0	0
4	Laine extensive	0	0	1	1	0	0
5	Laine extensive + superwash	0	0	1	0	0	1

Une fois les résultats obtenus pour chaque scénario suite à la caractérisation par la méthode ReCiPe endpoint 2016 (H, A), il est intéressant de regarder les catégories d'impact les plus contributrices au score unique pondéré. Le tableau suivant indique le pourcentage de contribution de chaque catégorie d'impact au score unique total en points du produit étudié dans le scénario 1 ainsi que les sigles qui seront utilisés pour chaque catégorie dans la présentation des résultats.

Tableau 6.6 : Contribution relative des catégories d'impact au score unique pour le scénario 1

Nom de catégorie	Sigle	Contribution au score unique
Changement climatique (santé humaine)	CC, HH	40.2%
Changement climatique (qualité des écosystèmes)	CC, EQ	25.3%
Formation de particules fines	PMF	20.7%
Déplétion des ressources fossiles	FRD	6.2%
Déplétion d'eau (écosystèmes)	WD, EQ	2.8%
Déplétion d'eau (santé humaine)	WD, HH	2.1%
Toxicité humaine	HT	1.8%

Tableau 6.6 : Contribution relative des catégories d'impact au score unique pour le scénario 1
(suite et fin)

Acidification terrestre	TA	0.4%
Déplétion des métaux	MRD	0.3%
Autres catégories	-	0.2%

L'enseignement apporté par le tableau ci-dessus est que l'indicateur de changement climatique est très largement majoritaire et représente à lui seul plus de 65% du score total d'impact en points obtenu par la méthode ReCiPe pour le scénario 1. Cela signifie que le principal impact environnemental de la laine peignée au cours de son cycle de vie est sur le changement climatique. La formation de particules fines, la déplétion des ressources fossiles et d'eau et la toxicité humaine semblent également être des points d'attention. Pour les autres catégories, il est cependant difficile d'évaluer leur importance relative étant donné le haut niveau d'incertitude sur l'interprétation de résultats endpoint normalisés et pondérés. Cette étude de contribution relative a également été réalisée pour les 4 autres scénarii et ne fait varier les ordres de contribution des catégories d'impact en aucun cas.

À la suite de ce premier résultat, il est alors intéressant de proposer une analyse de contribution par étape du cycle de vie pour chacun des 5 scénarii, comme présentée dans la figure ci-dessous pour la catégorie d'impact du changement climatique, qui est prépondérante comme nous venons de le voir.

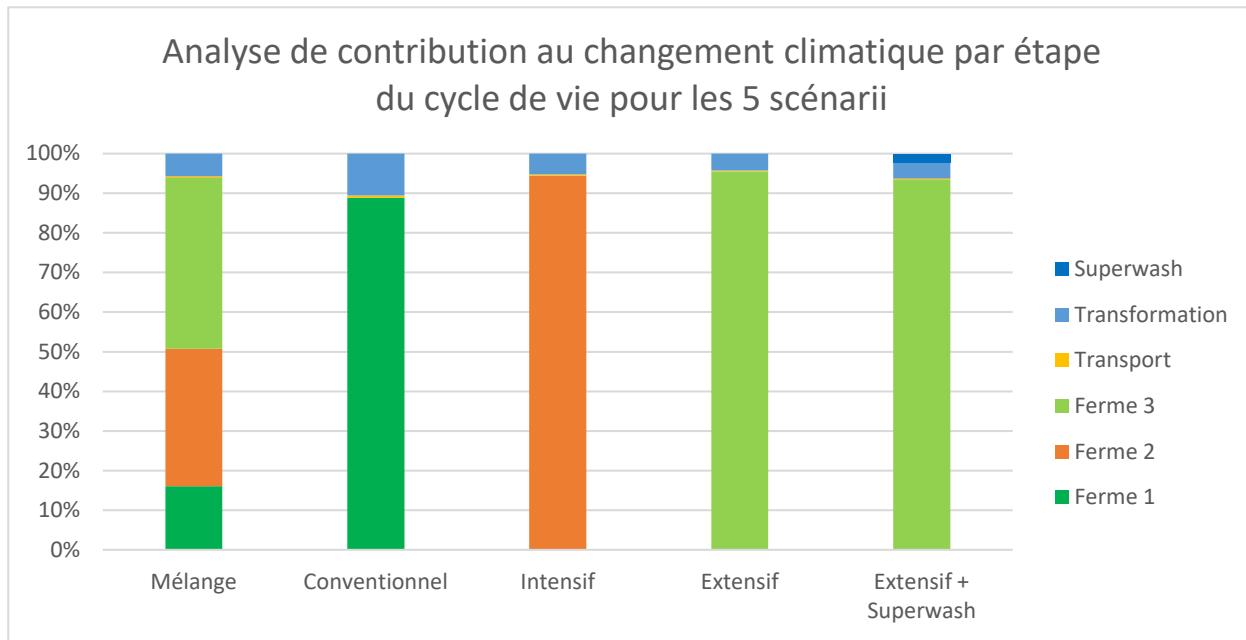


Figure 6.5 : Analyse de contribution au changement climatique par étape du cycle de vie pour les 5 scénarios

On peut observer que la grande majorité de l'impact sur le changement climatique est issue de la phase d'élevage et de tonte des moutons, quelle que soit la composition du lot de laine étudié ou quelques soient les processus optionnels qu'il subit. L'étape agricole représente ainsi à minima 90% de l'impact total sur le changement climatique et le transport à un impact très faible sur le changement climatique (environ 1% dans chaque cas). Vérifions que ce constat est également valide pour les autres catégories d'impact étudiées en observant la figure ci-dessous.

Elle représente l'analyse de contribution par étape du cycle de vie pour le scénario 5, dans lequel 100% de la laine d'un lot provient de la ferme 3 à agriculture extensive et biologique et avec un processus optionnel de Superwash.

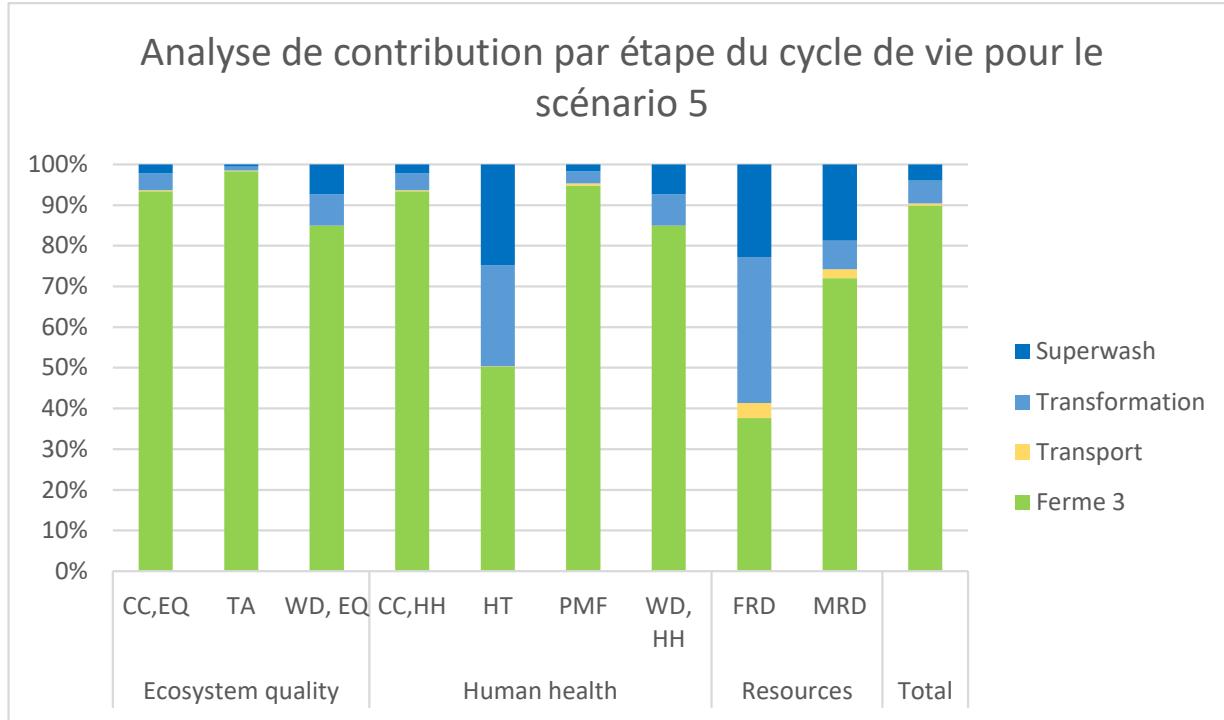


Figure 6.6 : Analyse de contribution par étape du cycle de vie pour le scénario 5

L’observation de la figure vient confirmer que la majorité de l’impact environnemental est issu de l’étape agricole. Les seules exceptions sont pour les catégories de toxicité humaine où l’étape agricole représente 49.5% de l’impact et pour la déplétion des ressources fossiles où elle représente 38% de l’impact. En observant ces résultats, on peut à nouveau rappeler une limite de cette étude expérimentale qui est que les données de fermes spécifiques aux fournisseurs de CLM n’ont pas pu être collectées, ce qui entraîne une incertitude importante sur la représentativité de ces résultats. Cela renforce le besoin accru de traçabilité sur l’amont agricole de la production de lots de laine peignée.

Maintenant que nous connaissons les catégories d’impact prédominantes et que nous savons que la phase agricole est la plus contributrice, il est intéressant de comparer l’impact relatif des 5 scénarios par catégorie d’impact, afin d’évaluer le taux de variabilité sur une même catégorie en fonction de la composition et des processus optionnels du lot de laine étudié. Ce résultat est présenté dans la figure ci-dessous.

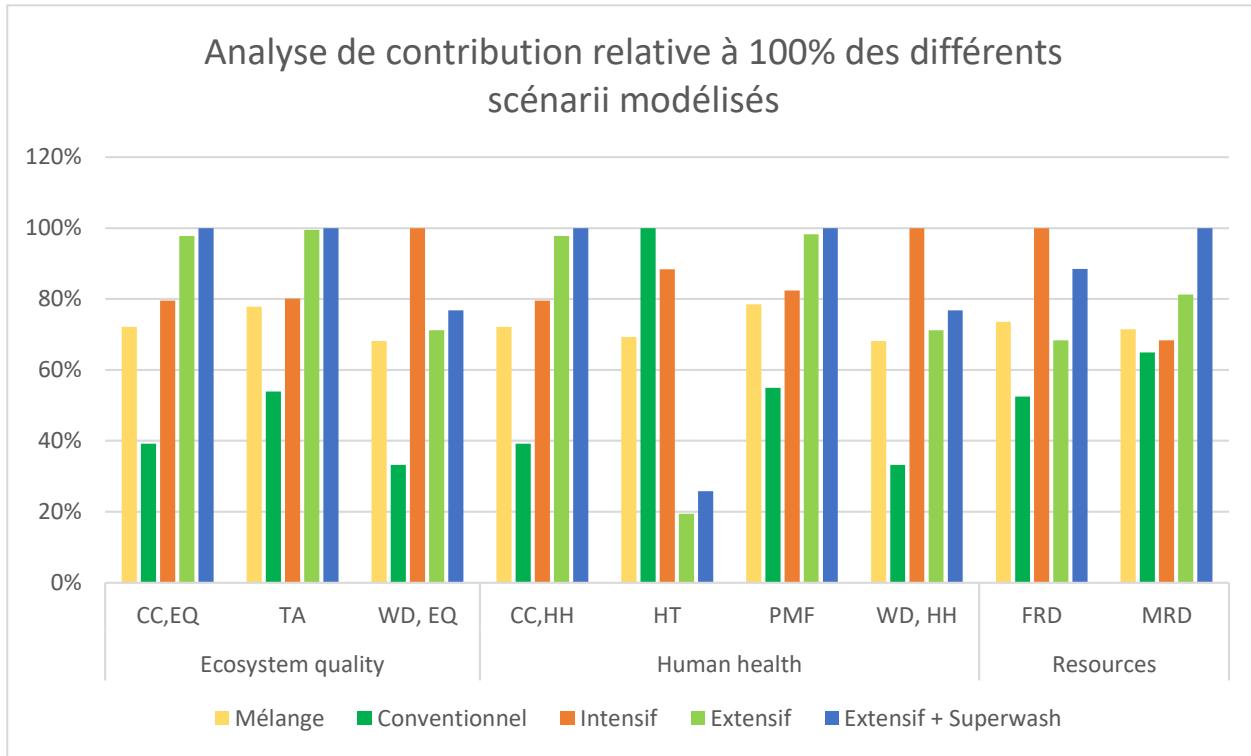


Figure 6.7 : Analyse de contribution relative à 100% des différents scénarii modélisés pour chaque catégorie d'impact

On observe ici une forte variabilité des résultats sur les catégories les plus impactantes en fonction des scénarii. En regardant l'indicateur CC, HH (qui contribue au score unique total à hauteur de 40.2%), on remarque par exemple qu'un lot de laine provenant entièrement de la ferme conventionnelle 1 représente seulement 40% de l'empreinte carbone d'un lot de laine qui proviendrait entièrement de la ferme extensive 3, soit un taux de variation de +150% entre la valeur minimale et la valeur maximale obtenues. De manière similaire, la figure ci-dessous présente l'ensemble des taux de variation d'impact entre les valeurs extrêmes des 5 scénarii pour chaque catégorie d'impact. Pour chaque catégorie d'impact, le taux de variation est calculé de la manière suivante :

$$\tau_{var} = 100 * \frac{\text{MAX(Scénario 1, ..., Scénario 5)} - \text{MIN(Scénario 1, ..., Scénario 5)}}{\text{MIN(Scénario 1, ..., Scénario 5)}}$$

Par exemple, pour HT, on soustrait le score minimum sur la toxicité humaine parmi les 5 scénarii au score maximum et on divise le tout par le score minimum sur la toxicité humaine.

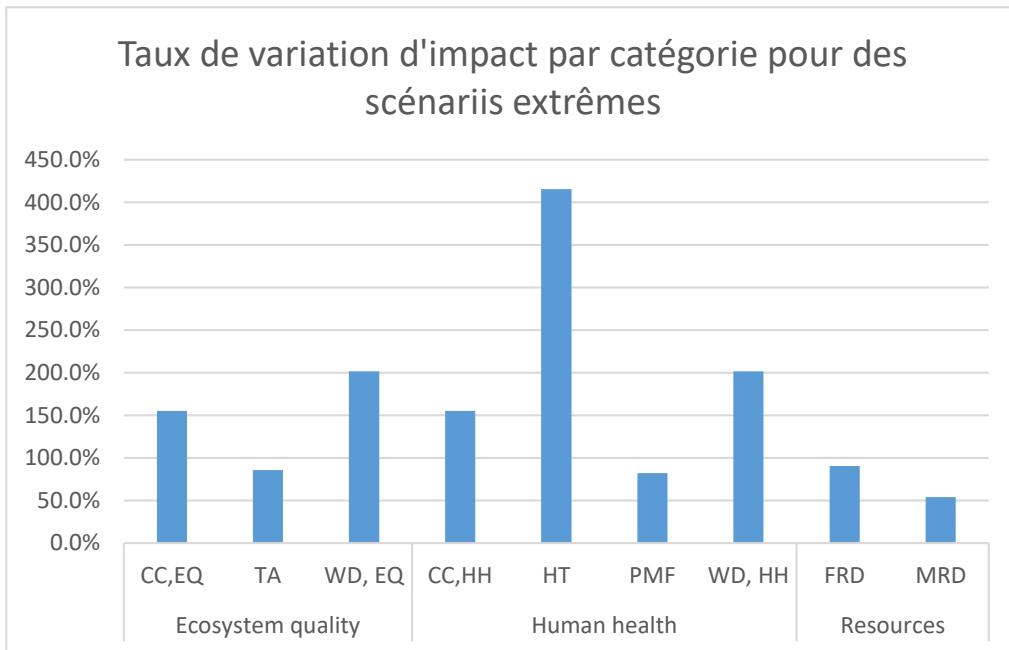


Figure 6.8 : Taux de variation d'impact par catégorie pour des scénarii extrêmes

Cette figure montre que, pour les 7 catégories d'impact principales identifiées à la suite de l'étude ACV de lots de laine, le taux de variation est supérieur à +50% en fonction de la composition des lots de laine et monte même jusqu'à +415.7% concernant la toxicité humaine (HT).

Pour visualiser cette variabilité de l'impact au global, il peut également être intéressant de comparer les scores uniques en points obtenus pour chacun des 5 lots de laine provenant des 5 scénarii différents, comme proposé dans la figure ci-dessous.

Elle nous montre une fois de plus que la variabilité observée pour quelques catégories d'impact majoritaires se répercute bien au global sur le score unique, qui prend en compte les 18 indicateurs midpoint agrégés, avec un taux de variation de +118% entre le conventionnel pur et l'extensif + superwash. Une autre observation que l'on peut faire est que l'ajout du processus optionnel de Superwash, bien qu'il utilise de nombreux produits détergents, ne semble pas avoir un impact majeur sur le score unique au global.

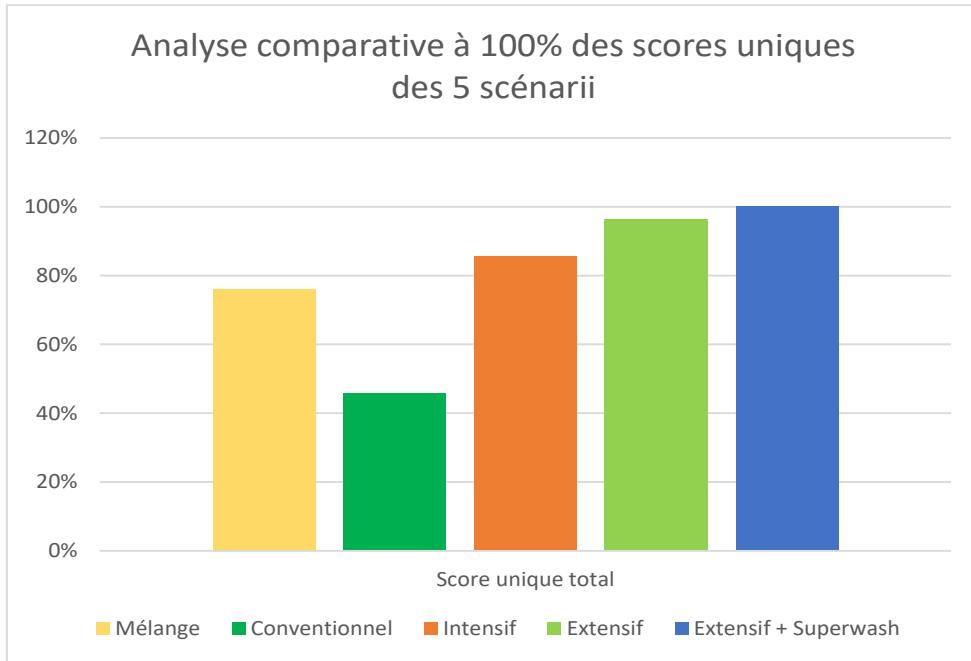


Figure 6.9 : Analyse comparative à 100% des scores uniques des 5 scénarii

En effet, entre le scénario 4 et 5, la laine est exactement de même composition avec simplement l'ajout d'un processus de traitement Superwash dans le scénario 5, et on observe seulement une augmentation faible du score unique global de +3.6% dans le scénario 5 par rapport au scénario 4.

Pour aller plus loin que les seuls 5 scénarii modélisés, on se propose également de visualiser l'évolution du score unique des lots de laine en faisant varier leur composition par incrément de 0.1 et en extrapolant les valeurs. Ainsi, la figure suivante présente une matrice qui fait varier verticalement la proportion de laine provenant de la ferme 1 et horizontalement la proportion de laine provenant de la ferme 2 dans un lot. La proportion de laine de la ferme 3 est donc logiquement $ferme_3 = 1 - (ferme_1 + ferme_2)$, car le modèle ne considère que 3 groupes de ferme. Pour interprétation, la matrice $M_{i,j}$ de ligne i et de colonne j est de taille 11x11. La proportion de laine de la ferme 1 est croissante selon i, la proportion de laine de la ferme 2 est croissante selon j et celle de la ferme 3 est décroissante selon i+j.

La visualisation de cette matrice permet plusieurs observations :

- Une nette diminution du score unique d'impact selon i croissant et j fixé lorsque la proportion de laine provenant de la ferme 1 augmente. Le score est un maximum global en

$M_{0,0}$ quand le lot est composé de 100% de laine de la ferme 3 et un minimum global en $M_{11,0}$ quand il est composé de 100% de laine de la ferme 1;

- Une stabilité du score unique d'impact selon i fixé et j croissant lorsque la proportion de laine provenant de la ferme 2 augmente. Le score est minimal localement en $M_{0,11}$ quand il est composé de 100% de laine de la ferme 2; et
- Une diminution du score unique en diagonale selon i=j lorsque la proportion de laine provenant de la ferme 3 diminue.

Matrice des scores uniques normés à 100% en fonction de la composition des lots en laine des fermes 1 et 2											
Ferme_1/Ferme_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89
0.1	0.95	0.94	0.93	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	
0.2	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81		
0.3	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.76			
0.4	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72				
0.5	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.68					
0.6	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64						
0.7	0.63	0.62	0.61	0.60							
0.8	0.58	0.57	0.56								
0.9	0.53	0.52									
1	0.47										

Figure 6.10 : Matrice des scores uniques normés à 100% en fonction de la composition des lots en laine des fermes 1 et 2

Cette figure illustre donc bien la grande variabilité de l'impact des lots en fonction de leur composition avec un taux de variation extrême de +118% mentionné précédemment.

Nous avons ainsi appris que l'amont agricole est le principal contributeur à l'impact des lots de laine et que la ferme 3 génère au global un impact environnemental plus important que la ferme 1. Cependant, l'inventaire ACV des fermes n'ayant pas été réalisé dans le cadre de cette étude, il est difficile d'expliquer précisément les raisons de ces écarts d'inventaire et donc d'impact. Il serait donc sans doute peu réaliste d'affecter de manière définitive un mode de production agricole (conventionnel ou organique, intensif ou extensif) à chacune des 3 fermes du modèle. Les écarts

d'impact entre les 3 fermes peuvent ainsi être liés à des cas particuliers de production de chacune des fermes, indépendamment des critères de classification choisis. Il faudrait sans doute aller plus loin dans la classification des fermes en intégrant d'autres critères. Le projet d'expérimentation reste cependant valide puisqu'il remplit son objectif de montrer la forte variabilité de l'impact en fonction de la ferme dont provient la laine.

6.3.2 Apports des données spécifiques par rapport à une ACV générique

Dans cette section, nous allons comparer l'écart de résultats d'impact obtenus par l'ACV générique réalisée en section 6.2.1 avec ceux de l'ACV d'évaluation réalisée en section 6.2.3. La structure générale du modèle ACV est la même pour les deux modélisations, la seule différence étant l'apport des données spécifiques à la filière de CLM pour l'ACV spécifique. Avant toute chose, il convient de signaler que nous nous attendons à obtenir des résultats d'impact très proches entre les 2 modèles. En effet, nous avons vu que la majorité de l'impact est associé aux activités agricoles dont nous n'avons pas pu obtenir de données spécifiques. Les processus agricoles des deux modèles sont donc identiques trait pour trait. Cependant, les processus de transport et de transformation sont nettement différents dans les deux modèles, ce qui entraînera des résultats différents. Comme l'ACV générique a été réalisée à partir de laine provenant à 100% de la ferme 1 conventionnelle du modèle de Cardoso (2013), nous allons ici présenter les résultats de l'ACV spécifique d'évaluation avec exactement la même composition en laine. La figure ci-dessous présente une analyse de contribution comparative entre les 2 ACV pour les catégories d'impact sélectionnées.

Malgré l'invariabilité du processus agricole, on observe malgré tout une variabilité assez importante de l'impact pour les différentes catégories entre les deux modèles ACV. Cette variabilité a deux causes principales :

- Premièrement, l'apport de données spécifiques pour les phases de transformation et de transport permet de préciser la mesure spécifique de l'impact pour ces étapes du cycle de vie et modifie en conséquence les résultats d'impact; et
- Également, l'apport des données spécifiques a été de déterminer plus précisément le taux de pertes de laine à la transformation. En effet, 1 kg de laine grasse en entrée d'usine ne correspond pas à 1 kg de laine peignée en sortie. Il y a d'abord des pertes au lavage, avec les masses de matière organique et de lanoline éliminées comptabilisées dans la masse de

laine grasse en entrée. Il y a ensuite différentes pertes au peignage avec le tri des fibres trop courtes et les différentes chutes de laine. À partir des données de traçabilité sur les volumes annuels de production, on a pu estimer un rendement de 0.7, c'est-à-dire qu'1 kg de laine grasse en entrée permet de produire 0.7 kg de laine peignée en sortie d'usine. En comparaison, l'estimation qui était faite dans l'étude de Cardoso utilisée pour l'ACV générique était un rendement de 0.85. Ces différences de rendement modifient proportionnellement l'impact environnemental, car moins le rendement est important, plus il faut s'approvisionner en laine grasse pour produire 1 kg de laine peignée. L'écart de modélisation des rendements entre les deux ACV explique donc l'écart d'impact obtenu.

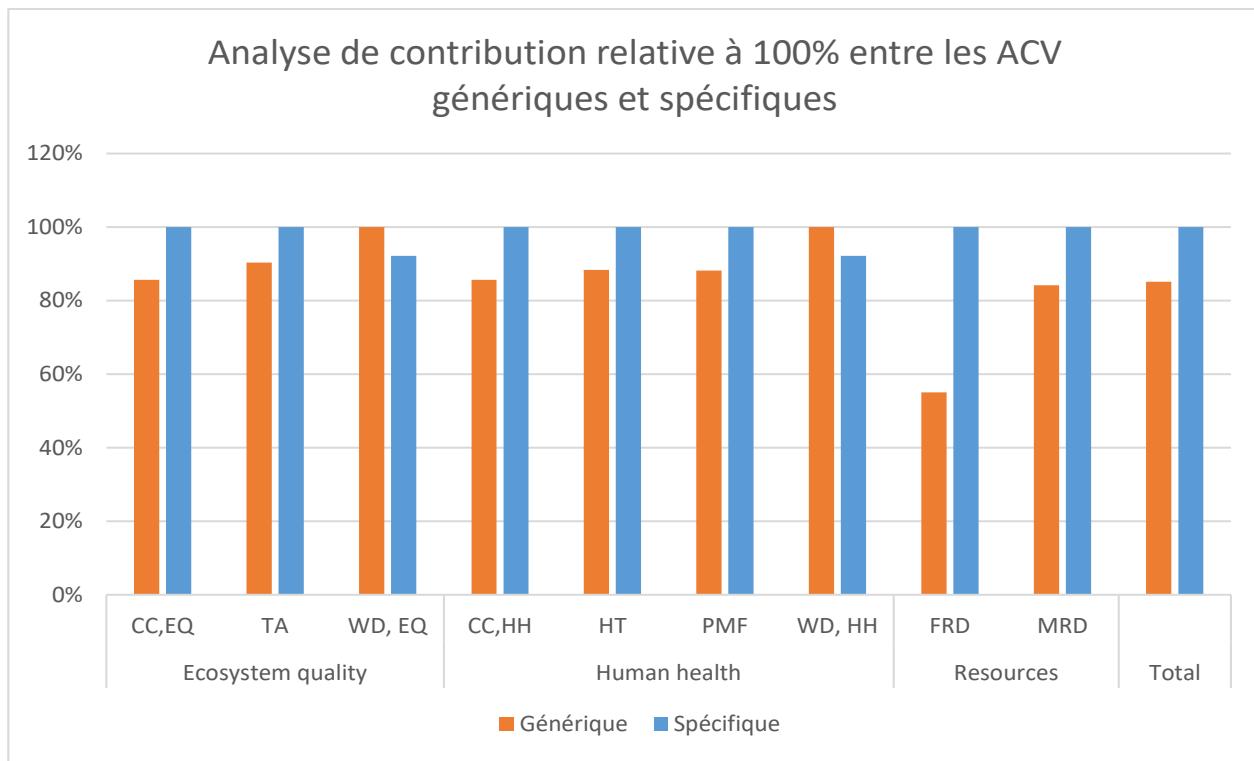


Figure 6.11 : Analyse de contribution comparative entre les ACV générique et spécifique

Pour souligner d'autant plus cette variabilité, qui montre l'apport des données spécifiques sur la représentativité d'une filière, la figure ci-dessous propose une analyse de contribution comparative uniquement sur la phase de transformation industrielle de la laine, qui est la phase pour laquelle des données spécifiques ont été apportées.

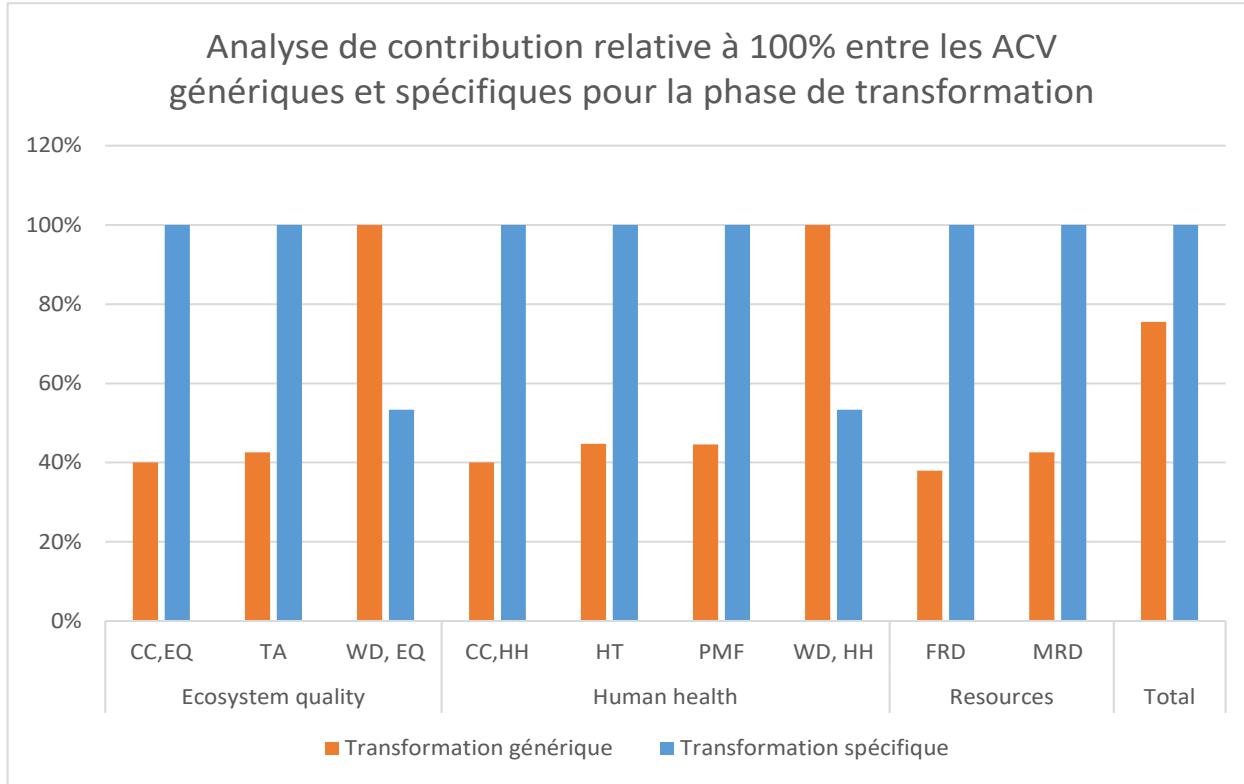


Figure 6.12 : Analyse de contribution comparative entre les ACV générique et spécifique pour la phase de transformation de la laine

Sur cette figure, la variabilité de l'impact environnemental entre les 2 ACV est beaucoup plus flagrante. Pour mieux quantifier ces écarts de résultat, la figure suivante présente les taux de variation de l'impact entre les deux modèles pour les différentes catégories d'impact, à la fois sur l'ensemble des étapes du périmètre d'étude ACV d'un côté et sur la seule étape de transformation de l'autre. Les taux de variation sont calculés selon la formule suivante :

$$\tau_{var} = 100 * \frac{Score_{spécifique} - Score_{générique}}{Score_{générique}}$$

On observe ici la très forte variabilité d'impact entre les 2 modèles ACV pour le processus de transformation industrielle (barres bleu ciel). Sur l'impact le plus prépondérant, le changement climatique, cette variabilité entre générique et spécifique pour l'étape de transformation est de +150%. Au global, la variabilité entre générique et spécifique pour l'étape de transformation est ainsi de +36%.

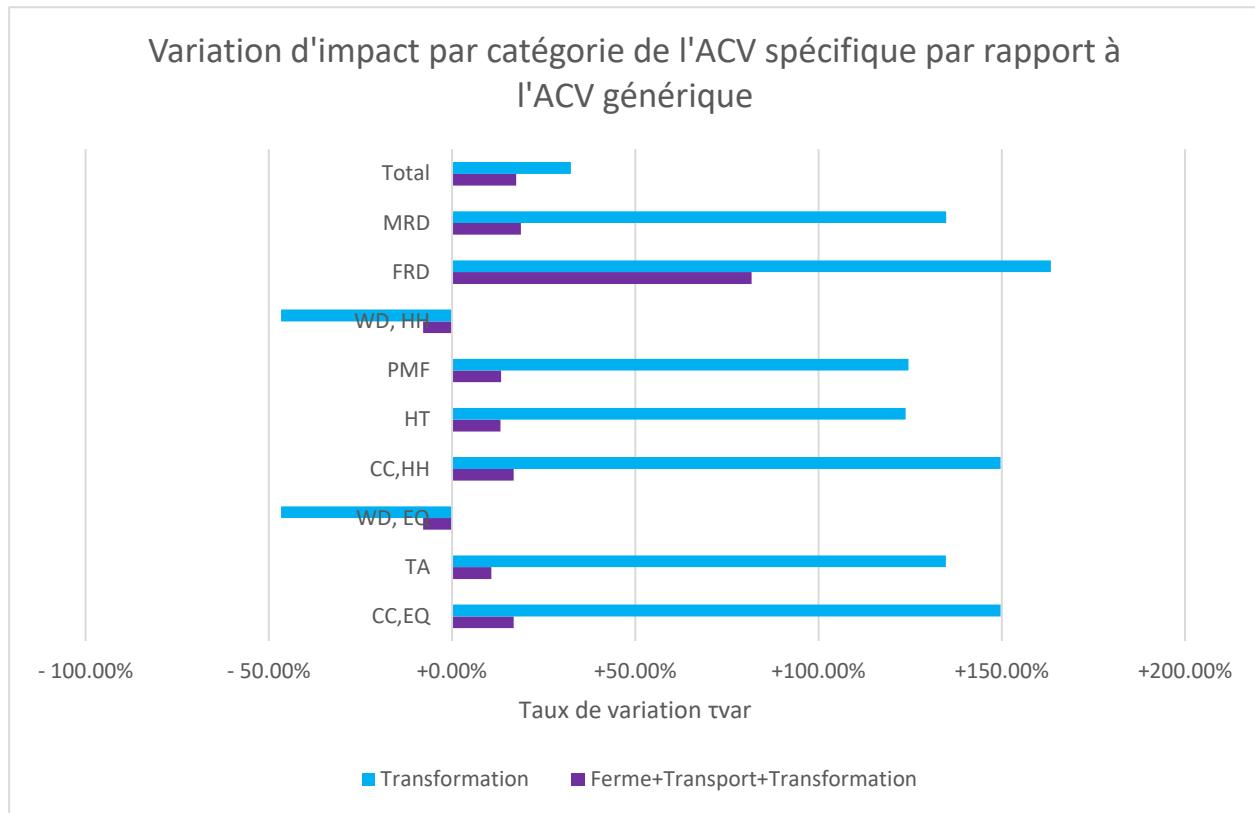


Figure 6.13 : Taux de variation d'impact par catégorie de l'ACV spécifique par rapport à l'ACV générique

On peut donc dire que l'apport de données spécifiques permet de changer complètement la mesure de l'impact d'un produit. Il serait alors intéressant de poursuivre l'étude avec des données spécifiques pour l'étape agricole afin de confirmer l'écart entre ACV spécifique et générique sur l'ensemble des étapes du cycle de vie et pas seulement sur l'étape de transformation industrielle.

6.3.3 Enseignements et apports des données de traçabilité pour le calcul ACV

Il est important de noter que ce projet d'expérimentation, dans la suite de la méthodologie développée, s'est focalisé sur l'apport de données de traçabilité pour l'ACV plutôt que sur l'apport de la technologie blockchain en elle-même pour l'ACV. Il n'a ainsi pas été établi de lien quantifiable entre les résultats d'impact obtenus et les caractéristiques inhérentes à la blockchain comme la décentralisation ou l'immutabilité. L'ensemble de cette étude a ainsi pris le parti pris d'utiliser spécifiquement la technologie blockchain comme outil de traçabilité après avoir remarqué sa grande performance à la suite de la revue de littérature.

Nous avons vu précédemment que l'impact environnemental des lots de laine peignée était extrêmement variable en fonction de leur composition. Un lot composé à 100% de laine provenant de l'élevage conventionnel de la ferme 1 aura donc un impact sur la toxicité humaine plus de 4 fois supérieur à un lot composé à 100% de laine provenant de l'élevage extensif biologique de la ferme 3. La réalisation d'une étude ACV unique et généralisable valable pour tous les lots de laine à partir d'une collecte de données unique à un instant donné semble donc peu adaptée à la modélisation de l'impact de ces produits et à l'identification de leviers d'amélioration par l'entreprise industrielle. En effet, on remarque que pour divers lots d'un produit fini identique issus de la même entreprise, il peut y avoir une incertitude colossale sur leur impact, qui se rajoute et surpassé bien largement l'incertitude déjà exprimée sur les données d'ACV et les méthodes de caractérisation employées. Il apparaît donc crucial dans ce contexte de mesurer un impact environnemental dynamique associé à chaque lot de produit à partir de données de production actualisées et facilement accessibles. Cette modélisation ACV dynamique appuyée sur les données de traçabilité de chaque lot permettrait ainsi de supprimer l'incertitude sur la composition des lots et la grande variabilité qu'elle induit. Au-delà de l'incertitude sur la composition des lots, les données de traçabilités permettraient de réduire les incertitudes liées :

- Au mode d'allocation des différents processus de transformation en connaissant exactement le flux de chaque lot de produit; et
- Au manque de représentativité temporel des données en fournissant les données actualisées les plus récentes disponibles.

Ainsi, la modélisation ACV dynamique permettrait non seulement d'améliorer la granularité de mesure de l'impact en offrant la possibilité aux clients de visualiser l'impact précis du lot de produit qu'ils achètent, mais permettrait également aux entreprises industrielles de piloter leur stratégie durable en visualisant en temps réel les sources d'impact des produits qui sortent de leurs usines et de détecter quasiment en temps réel une hausse de l'impact environnemental d'un lot. Également, les bonnes pratiques d'une entreprise qui souhaiterait réduire son impact environnemental et mettrait en place des actions pourraient donc être visualisées de manière dynamique par la réduction au cours du temps de l'impact environnemental calculé par l'ACV. Le système ACV-blockchain pourrait ainsi même devenir un outil d'auto-évaluation de l'efficacité des mesures de réduction d'impact prises par une entreprise industrielle.

L'autre apport de ce projet d'expérimentation a été de montrer que, pour améliorer les résultats d'une ACV d'un produit en laine, un système de traçabilité blockchain devait non seulement tracer les lots de produits lors de la transformation industrielle de lavage et de peignage de la laine, mais surtout permettre une traçabilité complète amont de la phase agricole qui est la plus contributrice à l'impact environnemental du produit. Cela permettrait ainsi d'éviter l'effet « boîte noire » de mesure des émissions au niveau de la ferme et d'augmenter grandement le niveau d'interprétabilité des ACV.

6.3.4 Limites de l'étude et incertitudes des résultats obtenus

Comme mentionné précédemment, ce projet d'expérimentation est soumis à plusieurs limites qui seront détaillées dans ce paragraphe. Tout d'abord, une limite déjà largement évoquée concerne l'absence de données spécifiques de la phase agricole pour l'ACV des lots de laine. Malgré le bénéfice théorique d'un système ACV-blockchain pour centraliser les données d'inventaire d'ACV, il est souvent difficile, voire impossible, d'accéder à certaines données amont, car les systèmes de collecte de données ne sont pas nécessairement matures. L'idéalisation de l'ACV-blockchain peut donc, comme dans le cadre de cette expérimentation, se heurter à la réalité du terrain. Cela a nécessairement impacté le niveau d'interprétabilité des ACV obtenues. De plus, même si l'apport des données de traçabilité est indéniable pour connaître la composition exacte des lots de laine et donc mieux approcher leur impact global, il n'est pas pour autant certain qu'il n'y ait pas de variabilité entre les différents lots de laine d'une même ferme et la modélisation de catégories de fermes comme des modèles de consommation et d'émission invariants n'est pas entièrement satisfaisante. Il serait ainsi intéressant de proposer dans une future recherche une étude plus poussée de l'apport des données de traçabilité sur la modélisation ACV de l'amont agricole et sur la variabilité des impacts d'une même ferme pour les différents ballots de laine produits et envoyés à l'usine de peignage.

Une autre limite de l'expérimentation concerne le périmètre de la chaîne de valeur choisie : CLM dispose en effet de nombreuses usines de peignage à travers le monde (en Chine, en Uruguay, en Argentine et aux États-Unis) et se fournit auprès de fermiers dans le monde entier. Cette étude se limite cependant à l'usine de peignage en Chine et à des modèles de ferme en Nouvelle-Zélande et en Australie. Il serait donc intéressant de proposer la même étude sur l'ensemble des chaînes de

valeur, d'autant plus qu'il peut fréquemment arriver que des lots de laine transformés en Chine soient issus de fermes uruguayennes par exemple.

Également, on peut argumenter que l'expérimentation est majoritairement intéressante grâce aux problématiques de composition des lots, de suivi des processus optionnels et de la mesure du rendement réel de production, qui sont résolues par l'apport de données spécifiques de traçabilité. Si les résultats sont probants sur une filière laine, il est possible que la variabilité et l'apport des données spécifiques sur la mesure d'impact de produits d'autres filières industrielles soient moins éloquents. Une future étude sur d'autres filières textiles ou agroalimentaires pourrait dans un premier temps venir confirmer les résultats de cette expérimentation.

A la suite de la revue de littérature, il faut également garder en tête le problème de la confiance des données qui sont enregistrées dans la blockchain et surtout s'interroger sur le déblocage que permettrait la traçabilité blockchain concernant l'accès aux données. En effet, la disponibilité des données sur toute la chaîne de valeur d'un produit dépend nécessairement de la bonne implantation d'une infrastructure de traçabilité blockchain performante chez tous les acteurs. Ce blocage a d'ailleurs pu être identifié lors de l'expérimentation avec l'impossibilité de récupérer les données des fermes qui ne faisaient pas partie du système de traçabilité.

Enfin, cette expérimentation est également soumise aux limites habituelles rencontrées dans les études ACV et doit amener à la question de la confiance des résultats obtenus en fonction de la qualité des données. Pour évaluer cette qualité, il faudrait évaluer leur représentativité technologique, géographique, et temporel ainsi que leur complétude, l'incertitude des paramètres et leur consistance pour obtenir un DQR. Une telle étude n'a cependant pas été menée dans le cadre de ce projet.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce mémoire était de proposer une méthodologie d'implantation d'un système ACV-blockchain après avoir démontré les opportunités de la traçabilité blockchain pour la mesure d'impact environnemental d'un produit industriel. Ce mémoire de recherche a proposé plusieurs contributions scientifiques permettant de répondre à cet objectif.

Tout d'abord, une revue de littérature systématique englobant les concepts de traçabilité, de blockchain et d'ACV a été réalisée avec une présentation détaillée des 2 articles actuellement existants qui évoquent l'implantation opérationnelle d'un système ACV-blockchain, répondant aux sous-objectifs 1 et 2 de ce mémoire. A notre connaissance, il s'agit de la première revue de littérature traitant spécifiquement du lien entre ces 3 concepts et identifiant les lacunes de la littérature sur ce sujet. La principale conclusion de cette revue a été que les articles présentant les systèmes ACV-blockchain définissaient des exemples d'architecture de construction et de cadres d'intégration intéressants mais faisaient l'impasse sur les activités et processus d'affaires nécessaires à l'implantation, les acteurs impliqués dans un tel projet, les livrables nécessaires ainsi que les aspects de gestion de projet et de gestion du changement. Il manquait également une expérimentation dans un contexte industriel d'une telle implantation afin d'identifier ses facteurs de succès et ses limites.

La méthodologie d'implantation d'un système ACV-blockchain dans un contexte industriel correspond ainsi à la seconde contribution scientifique majeure de ce mémoire. Découpée en 8 processus d'affaires principaux, elle permet d'accompagner les différents acteurs impliqués dans la mise en place d'un système ACV-blockchain pour la réalisation des activités et la répartition des responsabilités. Elle contribue ainsi à répondre à l'ensemble des lacunes évoquées précédemment et répond au sous-objectif 3 de ce mémoire. L'originalité de cette méthodologie est de combiner les meilleures pratiques de 3 domaines différents : la traçabilité blockchain, l'ACV et la gestion de projet, après consultation d'experts dans chacun de ces domaines.

Enfin, une troisième contribution de ce mémoire est l'expérimentation de cette méthodologie dans un contexte industriel, pour une filière textile de laine haut de gamme, qui a permis de répondre au sous-objectif 4. Cette expérimentation a permis de montrer que la forte variabilité sur l'impact environnemental de lots de laine peignée en fonction de leur provenance agricole et de leurs étapes de transformation justifiait le recours à la traçabilité pour déterminer un impact environnemental

unitaire par lot. Au-delà de cette conclusion, il a été montré dans l'expérimentation que l'apport de l'ensemble des données spécifiques par rapport aux données génériques était de caractériser beaucoup plus fidèlement l'impact environnemental d'un produit, et que la traçabilité blockchain était une bonne prétendante pour assurer une meilleure collecte de ces données. L'expérimentation a également montré l'importance de la bonne traçabilité amont des filières pour évaluer correctement l'impact des produits. Les applications industrielles des systèmes ACV-blockchain identifiées sont ainsi nombreuses : amélioration de l'éco-conception de produits, argument marketing auprès du client, connaissance de l'impact environnemental au lot, suivi de la performance environnementale de l'entreprise, évaluation des fournisseurs...

L'étude comporte cependant plusieurs limites. D'abord, au niveau de la revue de littérature. Plusieurs barrières organisationnelles et relatives à la chaîne de valeur viennent entraver les possibilités d'implantation de systèmes ACV-blockchain. Ensuite, au niveau de la méthodologie, qui n'a pas subi de processus de validation et n'a pas été expérimentée de bout en bout. Enfin, au niveau de l'expérimentation en elle-même. Les données spécifiques agricoles n'ont pas pu être collectées alors qu'il s'agit de données critiques à l'évaluation de l'impact environnemental. Également, le périmètre de l'étude ne permet pas de tirer des conclusions générales sur l'efficacité de systèmes ACV-blockchain : seules des fermes en Australie et Nouvelle-Zélande et une usine en Chine ont été modélisées, la filière laine n'est pas non plus nécessairement représentative de toutes les filières textiles, et encore moins de toutes les filières industrielles. Les incertitudes sur les résultats d'ACV peuvent enfin être un frein à l'interprétation de ces résultats pour la prise de décision industrielle.

L'ensemble de ces limites nous amène à plusieurs perspectives de recherche futures. Il serait par exemple intéressant par la suite d'effectuer une validation de la méthodologie développée ou d'obtenir un avis plus large d'un panel d'experts des 3 domaines couverts par cette méthodologie. Une étude plus poussée sur la conduite du changement qu'implique un projet d'implantation d'un système ACV-blockchain et sur l'accompagnement et la formation des acteurs du projet serait également un apport important. De plus, une expérimentation des dernières étapes d'implantation du système d'ACV dynamique basé sur la blockchain serait également fondamentale car elle permettrait d'affiner la compréhension de ces étapes, qui n'ont à notre connaissance jamais été réalisées. Ensuite, un travail de recherche sur la modélisation de l'impact environnemental des fermes et la construction d'inventaires représentatifs de lieux et de modes de production agricoles

serait un apport conséquent pour améliorer cette étude. Il faudrait ainsi pouvoir aboutir à une classification des fermes selon différents critères à définir pour regrouper les différents fournisseurs dans des groupes à impact environnemental proche. Une piste de recherche prometteuse serait également d'expérimenter l'implantation de systèmes ACV-blockchain à partir de cette méthodologie dans d'autres filières textiles dans un premier temps puis dans d'autres secteurs industriels. Le secteur de l'agroalimentaire pourrait par exemple être intéressant au vu des perspectives d'affichage environnemental des produits alimentaires qui se dessinent en France et en Europe. On peut aussi imaginer élargir le périmètre en intégrant à la traçabilité des données relatives aux impacts sociaux des entreprises et non plus seulement aux impacts environnementaux.

Pour conclure, la méthodologie développée dans ce mémoire constitue un premier pas vers l'opérationnalisation de systèmes ACV-blockchain et contribue à la valorisation de données de traçabilité pour le calcul d'impact environnemental de produits. Des études en prolongement de ce mémoire, notamment celles recommandées ci-dessus, seront cependant nécessaires pour motiver et réaliser l'implantation de tels systèmes à grande échelle.

RÉFÉRENCES

- Agrawal, T. K., Kumar, V., Pal, R., Wang, L., & Chen, Y. (2021). Blockchain-based framework for supply chain traceability: A case example of textile and clothing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107130. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107130>
- Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., & Rodríguez-González, S. (2020). An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 98, 102047. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.102047>
- Arena, A., Bianchini, A., Perazzo, P., Vallati, C., & Dini, G. (2019). BRUSCHETTA: An IoT Blockchain-Based Framework for Certifying Extra Virgin Olive Oil Supply Chain. 2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). Presented at the 2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). <https://doi.org/10.1109/smartcomp.2019.00049>
- Bakarich, K. M., Castonguay, J. "Jack," & O'Brien, P. E. (2020). The Use of Blockchains to Enhance Sustainability Reporting and Assurance*. *Accounting Perspectives*, 19(4), 389–412. <https://doi.org/10.1111/1911-3838.12241>
- Crystalchain. (2020). Présentation commerciale de la plateforme de traçabilité Crystalchain [Powerpoint slides 3 – 10].
- Diniz, E. H., Yamaguchi, J. A., Rachael dos Santos, T., Pereira de Carvalho, A., Alégo, A. S., & Carvalho, M. (2021). Greening inventories: Blockchain to improve the GHG Protocol Program in scope 2. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125900>
- European Commission. Joint Research Centre. (2016). Guide for interpreting life cycle assessment result. LU: Publications Office. <https://doi.org/10.2788/171315>
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance. LU: Publications Office. <https://doi.org/10.2788/38479>

- Farooque, M., Jain, V., Zhang, A., & Li, Z. (2020). Fuzzy DEMATEL analysis of barriers to Blockchain-based life cycle assessment in China. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106684. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106684>
- Feng, H., Wang, X., Duan, Y., Zhang, J., & Zhang, X. (2020). Applying blockchain technology to improve agri-food traceability: A review of development methods, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121031. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121031>
- Gardiner, P.D. (2005). Project Management: a strategic planning approach. Red Globe Press.
- Hastig, G. M., & Sodhi, M. S. (2020). Blockchain for Supply Chain Traceability: Business Requirements and Critical Success Factors. *Production and Operations Management*, 29(4), 935–954. <https://doi.org/10.1111/poms.13147>
- Henry, B. K., Russell, S. J., Ledgard, S. F., Gollnow, S., Wiedemann, S. G., Nebel, B., ... Swan, P. (2015). LCA of wool textiles and clothing. In *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing* (pp. 217–254). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100169-1.00010-1>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., van Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- International Organization for Standardization (2015). Traceability – Objectives, means and methods. (ISO Standard No. 9001:2015).
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2020). Modeling the blockchain enabled traceability in agriculture supply chain. *International Journal of Information Management*, 52, 101967. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.023>
- Karamachoski, J., Marina, N., & Taskov, P. (2020). Blockchain-Based Application for Certification Management. *Tehnički Glasnik*, 14(4), 488–492. <https://doi.org/10.31803/tg-20200811113729>
- Katsikouli, P., Wilde, A. S., Dragoni, N., & Høgh-Jensen, H. (2020). On the benefits and challenges of blockchains for managing food supply chains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(6), 2175–2181. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10883>

- Köhler, S., & Pizzol, M. (2020). Technology assessment of blockchain-based technologies in the food supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122193>
- Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
- LEAP (2015). Greenhouse gas emissions and fossil energy demand from small ruminant supply chains: Guidelines for quantification. Livestock Environmental Assessment and Performance partnership, FAO.
- Lim, M. K., Li, Y., Wang, C., & Tseng, M.-L. (2021). A literature review of blockchain technology applications in supply chains: A comprehensive analysis of themes, methodologies and industries. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107133>
- Mahyuni, L. P., Adrian, R., Darma, G. S., Krisnawijaya, N. N. K., Dewi, I. G. A. A. P., & Permana, G. P. L. (2020). Mapping the potentials of blockchain in improving supply chain performance. *Cogent Business & Management*, 7(1), 1788329. <https://doi.org/10.1080/23311975.2020.1788329>
- Mukherjee, A. A., Singh, R. K., Mishra, R., & Bag, S. (2021). Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework. *Operations Management Research*. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00180-5>
- Muthu, S. S. (2015). *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-00761-7>
- Paliwal, V., Chandra, S., & Sharma, S. (2020). Blockchain Technology for Sustainable Supply Chain Management: A Systematic Literature Review and a Classification Framework. *Sustainability*, 12(18), 7638. <https://doi.org/10.3390/su12187638>
- Park, A., & Li, H. (2021). The Effect of Blockchain Technology on Supply Chain Sustainability Performances. *Sustainability*, 13(4), 1726. <https://doi.org/10.3390/su13041726>

- Rolinck, M., Gellrich, S., Bode, C., Mennenga, M., Cerdas, F., Friedrichs, J., & Herrmann, C. (2021). A Concept for Blockchain-Based LCA and its Application in the Context of Aircraft MRO. *Procedia CIRP*, 98, 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.123>
- Rosado da Cruz, A., & Cruz, E. (2020). Blockchain-based Traceability Platforms as a Tool for Sustainability. Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems. Presented at the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems. <https://doi.org/10.5220/0009463803300337>
- Rosado da Cruz, A., Santos, F., Mendes, P., & Cruz, E. (2020). Blockchain-based Traceability of Carbon Footprint: A Solidity Smart Contract for Ethereum. Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems. Presented at the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems. <https://doi.org/10.5220/0009412602580268>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2018). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Saurabh, S., & Dey, K. (2021). Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124731>
- Shakhsbulatov, D., Arora, A., Dong, Z., & Rojas-Cessa, R. (2019). Blockchain Implementation for Analysis of Carbon Footprint across Food Supply Chain. 2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). Presented at the 2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). <https://doi.org/10.1109/blockchain.2019.00079>
- Shoaib, M., Lim, M. K., & Wang, C. (2020). An integrated framework to prioritize blockchain-based supply chain success factors. *Industrial Management & Data Systems*, 120(11), 2103–2131. <https://doi.org/10.1108/imds-04-2020-0194>
- Teh, D., Khan, T., Corbitt, B., & Ong, C. E. (2020). Sustainability strategy and blockchain-enabled life cycle assessment: a focus on materials industry. *Environment Systems and Decisions*, 40(4), 605–622. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09761-4>

Thériault, N. (2011). Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et nord-américaines du secteur textile (Grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, Québec). Repéré à https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7480/cufe_Theriault_N__12-09-2011_essai223.pdf?sequence=1&isAllowed=y

UNECE. (2021). Business Process Analysis for Sustainability and Circularity in the Leather Value Chain. United Nations.

Venkatesh, V. G., Kang, K., Wang, B., Zhong, R. Y., & Zhang, A. (2020). System architecture for blockchain based transparency of supply chain social sustainability. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, 101896. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101896>

Wang, M., Wang, B., & Abareshi, A. (2020). Blockchain Technology and Its Role in Enhancing Supply Chain Integration Capability and Reducing Carbon Emission: A Conceptual Framework. *Sustainability*, 12(24), 10550. <https://doi.org/10.3390/su122410550>

Zhang, A., Zhong, R. Y., Farooque, M., Kang, K., & Venkatesh, V. G. (2020). Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104512>

Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>

ANNEXE A STRUCTURE DE LA MÉTHODE DE CARACTÉRISATION RECIPE 2016

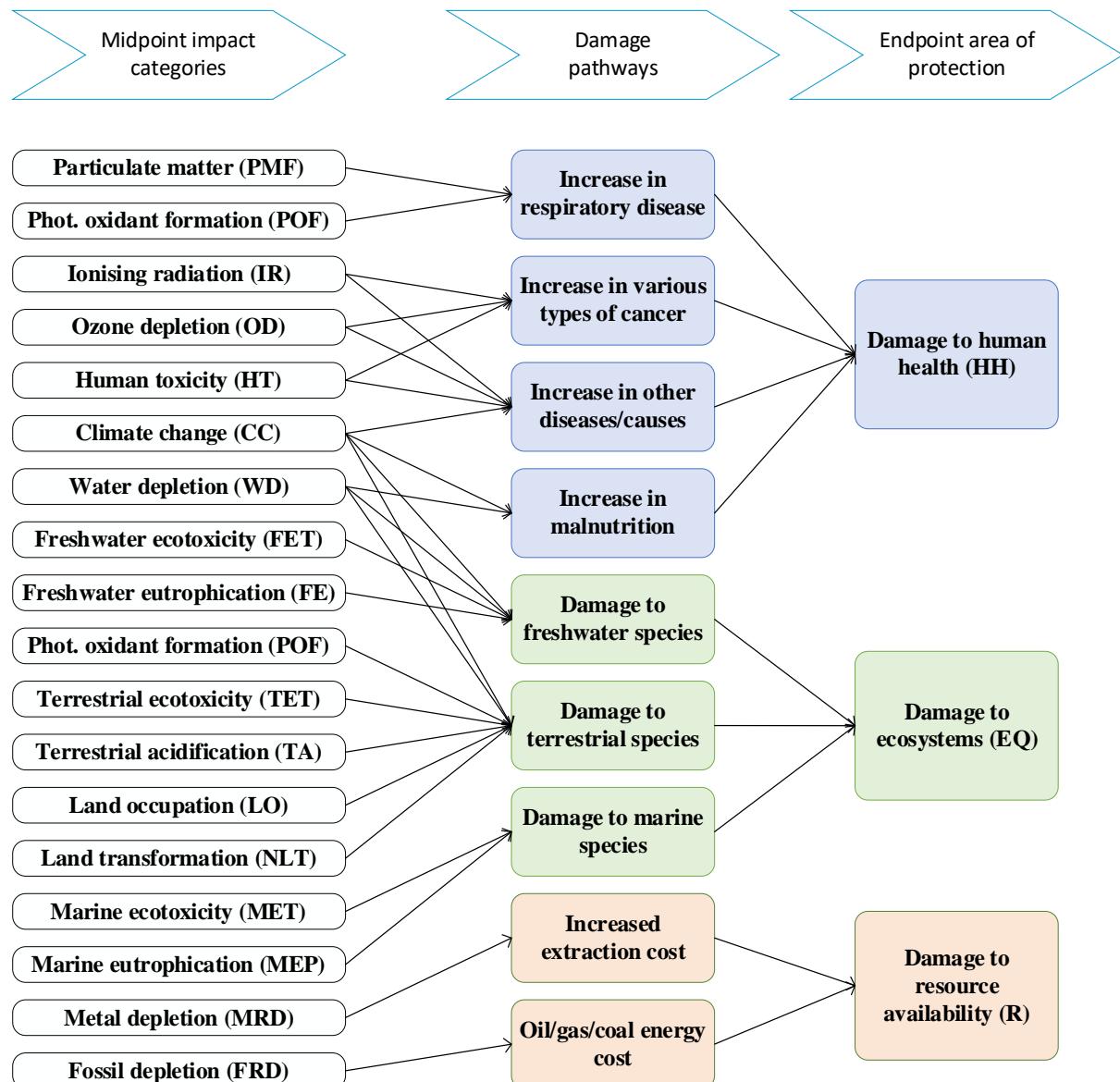


Figure A.1 : Structure méthodologique de ReCiPe 2016 (adapté de Huijbregts et al., 2016)

ANNEXE B DIAGRAMME DES PROCESSUS D'AFFAIRES ET SYSTÈME DE PRODUIT ACV

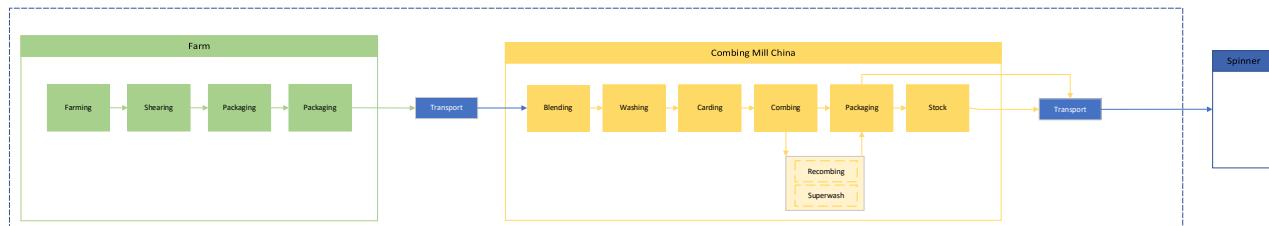


Figure B.1 : Diagramme simplifié des processus d'affaires de CLM

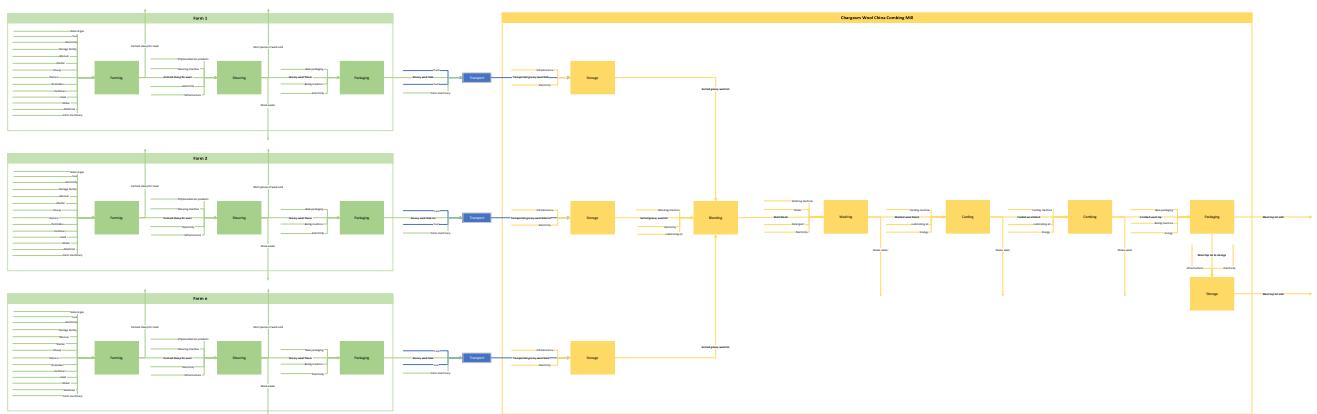


Figure B.2 : Système de produit ACV d'un lot de laine peignée en sortie d'usine de peignage

ANNEXE C TABLEAU DE COLLECTE DE DONNÉES D'INVENTAIRE POUR L'ACV

Tableau C.1 : Liste de données à collecter pour l'ACV et disponibilité sur la plateforme blockchain

Phase ACV	Type de données	Nom de la donnée	Unité	Disponibilité plateforme
Élevage des moutons et tonte	Informations sur l'élevage	Nombre d'unités	Unités	Oui
		Âge moyen des moutons	Années	Non
		Densité d'élevage	Unités/ha	Non
	Production de laine	Production annuelle de laine grasse	Kg	Non
		Rendement en laine	Kg/unité	Non
	Informations sur la ferme	Pays de localisation	-	Oui
		Surface totale	Ha	Non
		Type et origine du terrain	-	Non
	Eau/énergie	Consommation électrique	KWh	Non
		Consommation d'eau	M3	Non
	Machines	Machines utilisées pour l'élevage des moutons (nom et surface annuelle couverte)	Ha	Non
	Produits de traitement	Pesticides utilisés (nom et quantité)	Kg	Non
		Fertilisants utilisés (nom et quantité)	Kg	Non
		Traitements chimiques utilisés (nom et quantité)	Kg	Non
		Produits de soin des animaux	Kg	Non
	Nourriture	Nourriture utilisée (nom et quantité)	Kg	Non

Tableau C.1 : Liste de données à collecter pour l'ACV et disponibilité sur la plateforme blockchain (suite et fin)

Transport de la laine	Transport	Distance entre les fermes et l'usine de peignage	Km	
		Mode de transport utilisé	-	
		Masse de laine transporté depuis chaque ferme	Kg	
Transformation de la laine	Volumes de production	Production annuelle de laine peignée	Kg	
		Réception annuelle de laine grasse	Kg	
		Production annuelle de co-produits (nom, quantité)	Kg	
		Masse de laine annuelle des processus optionnels	Kg	
	Informations sur l'usine	Superficie du terrain occupé	M ²	
	Consommations de l'usine	Consommation électrique par processus	KWh	
		Consommation d'eau par processus	M3	
		Consommation de vapeur par processus	KWh	
		Génération annuelle d'eau usée	M3	
		Génération annuelle de boues d'épuration	Kg	
		Génération annuelle de déchets toxiques	Kg	
		Génération annuelle de déchets non-toxiques	Kg	
		Consommation de produits chimiques (nom et quantité)	Kg	
		Type d'équipement de production utilisé (nom et quantité)	Unités	
		Emballage utilisé (nom et quantité)	Kg	

ANNEXE D LISTE DES PROCESSUS UTILISÉS POUR LE MODÈLE ACV DEPUIS ECOINVENT ET AGRIBALYSE

Tableau D.1 : Liste des processus utilisés pour le modèle ACV depuis Ecoinvent et Agribalyse

Nom du processus utilisé	Base de données source
combine harvesting cut-off, S - RoW	Ecoinvent
fertilising, by broadcaster cut-off, S - RoW	Ecoinvent
Generic detergent-disinfectant, at plant - RER	Agribalyse
glyphosate production cut-off, S - RoW	Ecoinvent
grass silage production, organic cut-off, S - RoW	Ecoinvent
hay production cut-off, S - RoW	Ecoinvent
irrigation cut-off, S - RoW	Ecoinvent
maize grain, feed production cut-off, S - RoW	Ecoinvent
market for acetic acid, without water, in 98% solution state cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for cationic resin cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for electricity, low voltage cut-off, S - AU	Ecoinvent
market for hazardous waste, for incineration cut-off, S - RoW	Ecoinvent
market for lubricating oil cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for polyester resin, unsaturated cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for poultry manure, dried cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for silicone product cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for soda ash, dense cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for sodium sulfate, anhydrite cut-off, S - RoW	Ecoinvent
market for steam, in chemical industry cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for sulfuric acid cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market for tap water cut-off, S - RoW	Ecoinvent
market for urea, as N cut-off, S - GLO	Ecoinvent
market group for electricity, medium voltage cut-off, S - CN	Ecoinvent
Monoammonium phosphate (52% P2O5 8.4% N), at plant (WFLDB 3.5) - RER	Agribalyse
Single superphosphate, as P2O5 - FR	Agribalyse
soda production, solvay process Sodium bicarbonate - RER	Ecoinvent
sowing cut-off, S - RoW	Ecoinvent
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 cut-off, S - RoW	Ecoinvent
transport, freight, sea, transoceanic ship cut-off, S - GLO	Ecoinvent
transport, tractor and trailer, agricultural cut-off, S - RoW	Ecoinvent
treatment of biowaste by anaerobic digestion cut-off, S - RoW	Ecoinvent
treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year cut-off, U - RoW	Ecoinvent