

Titre: Traçabilité des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie minière : étude de cas sur la blockchain
Title: minière : étude de cas sur la blockchain

Auteur: Julien Pons
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Pons, J. (2024). Traçabilité des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie minière : étude de cas sur la blockchain [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/59286/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/59286/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Christophe Danjou, & Michel Gamache
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Traçabilité des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie minière :
étude de cas sur la blockchain**

JULIEN PONS

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Août 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Traçabilité des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie minière :
étude de cas sur la blockchain**

présenté par **Julien PONS**

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

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

Manuele MARGNI, président

Christophe DANJOU, membre et directeur de recherche

Michel GAMACHE, membre et codirecteur de recherche

Louise MILLETTE, membre

REMERCLEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à rédiger ce document de recherche.

Je remercie évidemment mon directeur de recherche, Christophe Danjou pour m'avoir encadré pendant la durée de ma maîtrise. Son support m'a permis de bien cibler les grandes lignes directrices de mon projet de recherche. Je le remercie également pour l'accès à son réseau qui m'a permis de disposer des ressources nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier mon co-directeur, Michel Gamache qui m'a apporté une grande aide dans mes travaux concernant les mises en relation avec des membres du monde professionnel minier. Mais aussi toutes les ressources qu'il m'a partagées pour mener ma recherche.

J'espère que vous prendrez plaisir à lire ce mémoire et qu'il vous motivera à plonger plus avant dans le sujet fascinant de la blockchain pour la traçabilité d'émissions de gaz à effet de serre. Si vous avez des questions ou des remarques, je peux être contacté pour vous fournir des explications.

RÉSUMÉ

Ce mémoire a examiné l'application de la technologie blockchain pour relever le défi crucial de la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'industrie minière. L'étude a démontré que la blockchain peut fournir une solution efficace, transparente et sécurisée pour suivre, consigner et authentifier les données relatives aux émissions de GES tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

L'analyse des pratiques actuelles dans le secteur minier a révélé un retard technologique important au Québec en matière de gestion des émissions de GES, mais aussi une opportunité pour adopter des technologies de pointe comme la blockchain. Les avantages clés identifiés comprennent la traçabilité complète des émissions de bout en bout, la réduction des fraudes et du double comptage, ainsi que l'amélioration de la transparence et de l'automatisation des audits environnementaux.

Le cas d'étude de la mine de lithium Sayona, située à Val-d'Or, a montré que l'intégration de la blockchain permet non seulement de répondre aux exigences réglementaires croissantes, mais également de réduire les coûts liés aux audits tout en augmentant la fiabilité des bilans carbone. Grâce à cette technologie, les entreprises minières peuvent non seulement mieux gérer leur empreinte carbone, mais aussi renforcer leur crédibilité en matière de durabilité et répondre aux attentes des parties prenantes.

En conclusion, cette recherche souligne que la blockchain pourrait devenir un standard pour la traçabilité des émissions de GES dans l'industrie minière, offrant une solution adaptée aux besoins d'automatisation et de transparence, et contribuant à la transition vers des pratiques plus écoresponsables.

ABSTRACT

This brief examined the application of blockchain technology to address the critical challenge of tracking greenhouse gas (GHG) emissions in the mining industry. The study demonstrated that blockchain can provide an efficient, transparent, and secure solution for tracking, logging, and authenticating GHG emissions data throughout the supply chain.

An analysis of current practices in the mining sector revealed a significant technological gap in Quebec when it comes to managing GHG emissions, but also an opportunity to adopt cutting-edge technologies such as blockchain. Key benefits identified include full end-to-end traceability of emissions, reduced fraud and double-counting, and improved transparency and automation of environmental audits.

The case study of the Sayona lithium mine, located in Val-d'Or, showed that integrating blockchain not only helps meet growing regulatory requirements, but also reduces audit-related costs while increasing the reliability of carbon footprints. Thanks to this technology, mining companies can not only better manage their carbon footprint but also strengthen their sustainability credibility and meet stakeholder expectations.

In conclusion, this research highlights that blockchain could become a standard for GHG emissions traceability in the mining industry, offering a solution tailored to the need for automation and transparency and contributing to the transition towards more eco-responsible practices.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et Justification	1
1.1.1 Défis environnementaux et réglementaires	1
1.1.2 Industrie minière pour un avenir durable	3
1.2 Définition de la traçabilité et des méthodes existantes	3
1.2.1 Définition de la traçabilité	4
1.2.2 Diverses solutions de traçabilité.....	6
1.2.3 Flux massifs de données.....	9
1.3 Enjeux de traçabilité des critères ESG dans l'industrie minière	9
1.4 Objectif.....	12
1.5 Plan du mémoire.....	13
CHAPITRE 2 LIMITATIONS ET DÉFIS DE LA TRAÇABILITÉ DES ÉMISSIONS DE GES	14
2.1 Gestion ergonomique de l'information	14
2.1.1 Automatisation	14
2.1.2 Différents degrés de visibilité	15

2.1.3	Sécurité de l'information.....	17
2.2	La chaîne d'approvisionnement	18
2.2.1	Engagement de l'ensemble des acteurs	19
2.2.2	Interopérabilité et architecture de données.....	20
2.2.3	Manque de confiance	22
2.3	Comparaison système centralisé vs décentralisé.....	23
2.3.1	Analyse de l'existant	23
2.3.2	Différences des caractéristiques	23
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE		26
3.1	Suivi des émissions de GES	26
3.1.1	Types d'émissions	27
3.1.2	Outils de gestion.....	28
3.1.3	Réglementations	29
3.1.4	Tendances.....	29
3.2	Technologie de la Blockchain	30
3.2.1	Définition	30
3.2.2	Exemple de fonctionnement.....	30
3.2.3	Mécanisme de consensus	36
3.2.4	Architecture	38
3.3	Traçabilité Blockchain des émissions de GES	39
3.3.1	Stratégie de Systematic Literature Review (SLR)	39
3.3.2	Discussion des deux études de cas	42
3.3.3	Automatisation des calculs d'émissions.....	43
3.3.4	Limitations	43

3.3.5	Avantages de la blockchain	44
3.4	Manque de la littérature et problématique.....	45
3.5	Les sous-objectifs	46
3.6	Présentation de la suite du mémoire.....	47
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DU SUIVI DES ÉMISSIONS DE GES		48
4.1	Étude préliminaire	48
4.1.1	Objectif	48
4.1.2	Enjeux.....	49
4.1.3	Limites.....	50
4.1.4	Contraintes	51
4.2	Étapes du processus de traçabilité.....	52
4.2.1	Cartographier la chaîne de valeur.....	53
4.2.2	Identifier les sources d'émissions de GES	54
4.2.3	Développer la stratégie de traçabilité	54
4.2.4	Identifier de la plateforme technologique	57
4.2.5	Identifier les critères et normes applicables	57
4.3	Résultats du pilote	58
CHAPITRE 5 SOLUTION BLOCKCHAIN DÉVELOPPÉE : TRANSPARENSII		61
5.1	Architecture de la plateforme	61
5.1.1	Déploiement de la solution.....	62
5.1.2	Spécifications de la solution.....	63
5.1.3	Comment ça marche	66
5.1.4	Interopérabilité avec d'autres applications.....	72
5.2	Discussion et comparaison	72

5.2.1	Comparaison technique	72
5.2.2	Fonctionnalités et capacité d'analyse	74
5.3	Analyse multicritère	74
5.3.1	Solutions ciblées.....	75
5.3.2	Critères sélectionnés.....	76
5.3.3	Stratégie de pondérations	79
5.3.4	Évaluation des solutions	81
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	86
RÉFÉRENCES	88	
ANNEXES	94	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Problèmes fréquemment inclus dans les rapports de durabilité des entreprises cotées l'indice TSXComposite en 2019. Adapté de (Cho et al., 2020).....	2
Tableau 1.2 Pourcentage d'utilisation des technologies de communication et d'informations par les entreprises au Canada en 2021. Adapté de (Statistics Canada, 2020).....	6
Tableau 1.3 Critères de décision importants qui justifient les investissements numériques dans les mines. Adapté de (Vaillancourt et al., 2019, p. [16])	11
Tableau 2.1 Liste des cadres de sécurité applicatives	18
Tableau 2.2 comparatif entre les deux types de réseaux centralisé et décentralisé. Inspiré de (Lupaiescu et al., 2022) (Mendi et al., 2020) (Puthal et al., 2018)	24
Tableau 3.1 Description des trois catégories de scopes	27
Tableau 3.2 Tableau représentant les quatre fonctions de hachage les plus courantes. Inspiré de (GCHQ, 2024).....	32
Tableau 3.3 Plan de concept et mots-clés	39
Tableau 3.4 Plan de concept optimisé et mots-clés.....	41
Tableau 4.1 Les principaux postes d'émissions de GES chez Sayona.....	55
Tableau 5.1 Comparaison avec les critères de la revue de littérature	73
Tableau 5.2 Tableau de pondération et score des différents critères	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Début d'une chaîne d'approvisionnement minière. Source : Auteur.....	5
Figure 1.2 Représentation des fonctionnalités des différents logiciels de gestion. Adaptée de (Pellerin, 2023).....	8
Figure 1.3 Image des différents niveaux de maturité numérique. Adaptée de (Vaillancourt et al., 2019, p. [18]).....	10
Figure 2.1 Représentation UML diagramme de classe	16
Figure 2.2 Différents degrés de visibilité entre les acteurs d'une chaîne d'approvisionnement. Source : Auteur.....	17
Figure 2.3 Exemple de représentation d'une chaîne d'approvisionnement complète. Adaptée de (Fang et al., 2018)	20
Figure 2.4 Schéma représentant la communication API REST. Adaptée de Canva.com	21
Figure 2.5 Taille du marché mondial des systèmes décentralisés par études de cas. Adaptée de (Transforma Insights, 2021)	25
Figure 3.1 Exemple simplifié d'un bloc de la blockchain.....	33
Figure 3.2 Explication du nonce	33
Figure 3.3 Exemple simplifié d'une chaîne de blocs	34
Figure 3.4 Représentation d'une chaîne de blocs fausse.....	35
Figure 3.5 Exemple réseau chaîne de blocs distribués	36
Figure 3.6 Schéma d'une architecture simple blockchain.....	38
Figure 3.7 Résultats de la recherche par mots-clés	40
Figure 3.8 Résultats de la recherche optimisée par mots-clés.....	42
Figure 4.1 Objectifs du projet chez Sayona	48
Figure 4.2 Description des principaux enjeux au sein de Sayona	49

Figure 4.3 Les enjeux futurs pour la traçabilité GES au sein de Sayona	50
Figure 4.4 Schéma des différentes étapes de la mise en place	52
Figure 4.5 Schéma simplifié des limites de la cartographie. Source : Auteur	53
Figure 4.6 Exemple d'un tableau de consommations du sous-poste Combustion fossile source fixe	58
Figure 4.7 Exemple d'un tableau de répartition par type de GES d'un sous-poste	59
Figure 4.8 Exemple d'un tableau d'incertitudes d'un sous-poste	59
Figure 5.1 Architecture de l'application décentralisée (dApp) utilisant la Blockchain	62
Figure 5.2 Déploiement du smart contract en utilisant Remix	63
Figure 5.3 Représentation des composants struct du smart contract.....	64
Figure 5.4 Différentes fonctions add du smart contract	65
Figure 5.5 Fonctions get du smart contract	66
Figure 5.6 Connexion au réseau Blockchain via Metamask	67
Figure 5.7 Diagramme de cas d'utilisation de l'application décentralisée (Dapp)	68
Figure 5.8 Page d'accueil interface web	69
Figure 5.9 Page de Calcul onglet Combustibles Interface Web.....	70
Figure 5.10 Page Bilan interface web	71
Figure A.1 Diagramme EPC représentant la chaîne d'approvisionnement du spodumène	94
Figure B.1 Page d'accueil outils de calculs d'émissions de GES	97
Figure B.2 Page Combustibles outils de calculs d'émissions de GES	98
Figure B.3 Page Recap CO2e outils de calculs d'émissions de GES	99
Figure B.4 Page Bilan outils de calculs d'émissions de GES	99
Figure B.5 Page norme ISO outils de calculs d'émissions de GES	100
Figure B.6 Page norme GHG Protocol outils de calculs d'émissions de GES	100
Figure B.7 Page Graphiques outils de calculs d'émissions de GES	101

Figure B.8 Page Facteurs d'émissions Energie outils de calculs d'émissions de GES..... 101

Figure B.9 Tableau de bord Power BI des émissions de GES de Sayona..... 102

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AHP : Analytic Hierarchy Process

API : Application Programming Interface

BPMN : Business Process Model and Notation

CEFARIO : Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO₂ e : Équivalent dioxyde de carbone

EPC : Event-driven Process Chain

ERP : Enterprise Resource Planning

ESG : Environmental, Social, and Governance

GES : Gaz à effet de serre

HTTP : HyperText Transfer Protocol

INMQ : Institut National des Mines du Québec

INRS : Institut national de la recherche scientifique

IoT : Internet of Things

ISO : International Organization for Standardization

IT : Information Technology

JSON : JavaScript Object Notation

LAN : Lithium Amérique du Nord

MQTT : Message Queuing Telemetry Transport

ONG : Organisations non gouvernementales

POC : Proof of Concept

PoS : Proof of Stake

PoW : Proof of Work

RFID : Radio Frequency Identification

UML : Unified Modeling Language

XML : eXtensible Markup Language

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A DIAGRAMME EPC DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT	94
ANNEXE B RÉSULTATS DU PILOTE.....	97

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et Justification

Le présent travail de recherche se concentre sur l'application de la technologie blockchain pour la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'industrie minière. Alors que les impacts environnementaux, tels que le réchauffement climatique et la dégradation des écosystèmes, deviennent de plus en plus préoccupants, les pressions pour une gestion rigoureuse des émissions de carbone se font de plus en plus pressantes. Cela coïncide avec une évolution notable de l'industrie vers des pratiques plus écoresponsables et une orientation vers des opérations plus vertes. La *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, devenue une loi le 29 juin 2021, intègre dans la loi canadienne l'engagement du pays à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (Gouvernement du Canada, 2024a).

Plusieurs recherches montrent les progrès accomplis par les sociétés canadiennes les plus importantes en matière de communication sur les informations environnementales, sociales et de gouvernance (ESG). En effet, sur une base de trois indices boursiers (G250, S&P 500 et TSX Composite Index) on a en moyenne 83% des organismes canadiens qui font des rapports ESG pour leurs investisseurs (Cho et al., 2020). De plus, de 2005 à 2021, les émissions de GES du Canada ont diminué de 8,4 % (62 Mt d'équivalent CO₂) (Gouvernement du Canada, 2023).

Ainsi, ce travail de recherche s'aligne parfaitement avec la tendance du marché canadien en matière de durabilité, en offrant une solution innovante pour améliorer la gestion et le suivi des émissions de carbone dans les industries à forte intensité énergétique, telles que l'industrie minière.

1.1.1 Défis environnementaux et réglementaires

Il existe de nombreuses particularités à prendre en compte lorsque l'on fait des déclarations ESG. Selon l'article de revue « *Advancing Sustainability Reporting in Canada: 2019 Report on Progress* » (Cho et al., 2020), le plus important est de cibler les indicateurs clés pertinents pour les investisseurs, mais aussi d'assurer la conformité avec les normes environnementales. Cette conformité concerne non seulement les actions entreprises par la société pour réduire son impact

environnemental, mais aussi la réalisation et la communication des objectifs environnementaux fixés, en s'assurant que ceux-ci respectent les lois et les règlements en vigueur. Parmi ces indicateurs, on retrouve souvent la santé et la sécurité au travail et les changements climatiques, mais aussi bien d'autres (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Problèmes fréquemment inclus dans les rapports de durabilité des entreprises cotées l'indice TSXComposite en 2019. Adapté de (Cho et al., 2020)

Problème	Nombre de compagnies	Pourcentage
Santé et sécurité	139	82%
Changement climatique	127	75%
Eau	113	66%
Diversité	104	61%
Chaîne d'approvisionnement	85	50%
Premières Nations	81	48%
Droits humains	69	41%

Pour faciliter la préparation des rapports, il existe de nombreux standards et cadres applicables, tels que le Protocole GHG ou la norme ISO 14001, qui sont des références largement reconnues. Cependant, les entreprises font face à des défis, notamment en raison des complexités réglementaires et politiques qui varient selon les juridictions et peuvent rendre la mise en conformité plus difficile. Bien que ces standards soient reconnus par de nombreux acteurs comme étant fiables, lorsqu'il s'agit de déclarations obligatoires auprès des gouvernements, ces cadres peuvent ne pas être nécessairement reconnus par les vérificateurs. C'est pourquoi il est essentiel de collaborer avec une équipe en environnement qui connaît les exigences, que ce soit au niveau provincial ou fédéral.

1.1.2 Industrie minière pour un avenir durable

En ce qui concerne l'industrie minière, les exigences à propos de l'environnement sont d'autant plus importantes, puisqu'en général les industries à fort impact sont beaucoup plus susceptibles de publier des rapports ESG. En effet, les industries dont l'impact est relativement faible publient moins de rapports (60 % en moyenne, contre 83 % pour les industries à fort impact). Cet écart s'explique par le fait que plus les industries ont un impact faible, moins elles sont susceptibles d'être confrontées à des exigences réglementaires strictes et à de fortes demandes de la part des consommateurs, des employés et des ONG (Cho et al., 2020).

Par conséquent, l'évolution technologique dans le secteur minier dévoile de nouvelles opportunités pour l'analyse de ces indicateurs. En effet, la transformation numérique a doté certaines mines d'une très bonne maturité numérique, favorisant ainsi l'implémentation de solutions avant-gardistes. Dans ce contexte, ce mémoire se propose d'explorer la manière dont la technologie peut se raccorder avec la transition écoresponsable des mines, non seulement pour relever le défi de la traçabilité des émissions de carbone, mais également pour instaurer une gestion plus transparente, sécurisée et autonome des données dans ce secteur en mutation.

1.2 Définition de la traçabilité et des méthodes existantes

Au cours des dernières années, on a pu observer une avancée significative des technologies dans le secteur minier, qu'il s'agisse de mines souterraines ou à ciel ouvert. Il devient essentiel d'adopter des méthodes de travail de plus en plus efficaces, en mettant l'accent sur le traitement des données et l'optimisation pour répondre aux exigences gouvernementales. Des initiatives d'optimisation se multiplient, telles que la réduction du temps de trajet des camions, l'identification des sources de pannes pour la maintenance, et la mise en place de la connectivité en mines souterraines afin d'avoir un contrôle total sur les opérations depuis la surface (Vaillancourt et al., 2019).

Cette évolution génère un flux massif de données. Lorsqu'elles sont filtrées et traitées, ces données fournissent des indicateurs de performance très pertinents. En les filtrant et en les traitant de manière efficace, ces données fournissent des indicateurs de performance pertinents pour les

investisseurs et les clients. Cela pousse les mines à adopter des outils technologiques avancés pour analyser ces informations en profondeur, afin de mieux répondre aux attentes du marché. Par ailleurs, l'industrie minière joue un rôle clé en garantissant un approvisionnement stable en matières premières, en particulier en minéraux critiques et stratégiques, essentiels à la fabrication de batteries et d'autres technologies vertes (Institut national des mines, 2023).

1.2.1 Définition de la traçabilité

La traçabilité est un aspect crucial qui permet un accès complet aux informations associées à un objet spécifique. Dans le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les systèmes de traçabilité s'appuient sur diverses techniques d'identification telles que les codes-barres, les étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID), les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et le code produit électronique (EPC) pour capturer et partager les données pertinentes. L'utilisation d'appareils intelligents implique souvent des codes-barres conformes aux normes GS1, comprenant des identifiants de produits tels que les dates de production et de péremption des lots. Les informations encodées dans ces codes-barres traversent les différents nœuds de la chaîne d'approvisionnement, facilitant ainsi l'enregistrement des transferts de propriété.

Pour illustrer ce concept, prenons l'exemple de l'exploitation des minerais. L'image ci-dessous représente un fragment la chaîne de valeur d'une exploitation minière, depuis la mine jusqu'à la fonderie. Il est important de souligner que le diagramme ne représente pas explicitement tous les acteurs impliqués, compte tenu du nombre de fournisseurs de différents pays qui font partie intégrante de l'exercice de traçabilité.

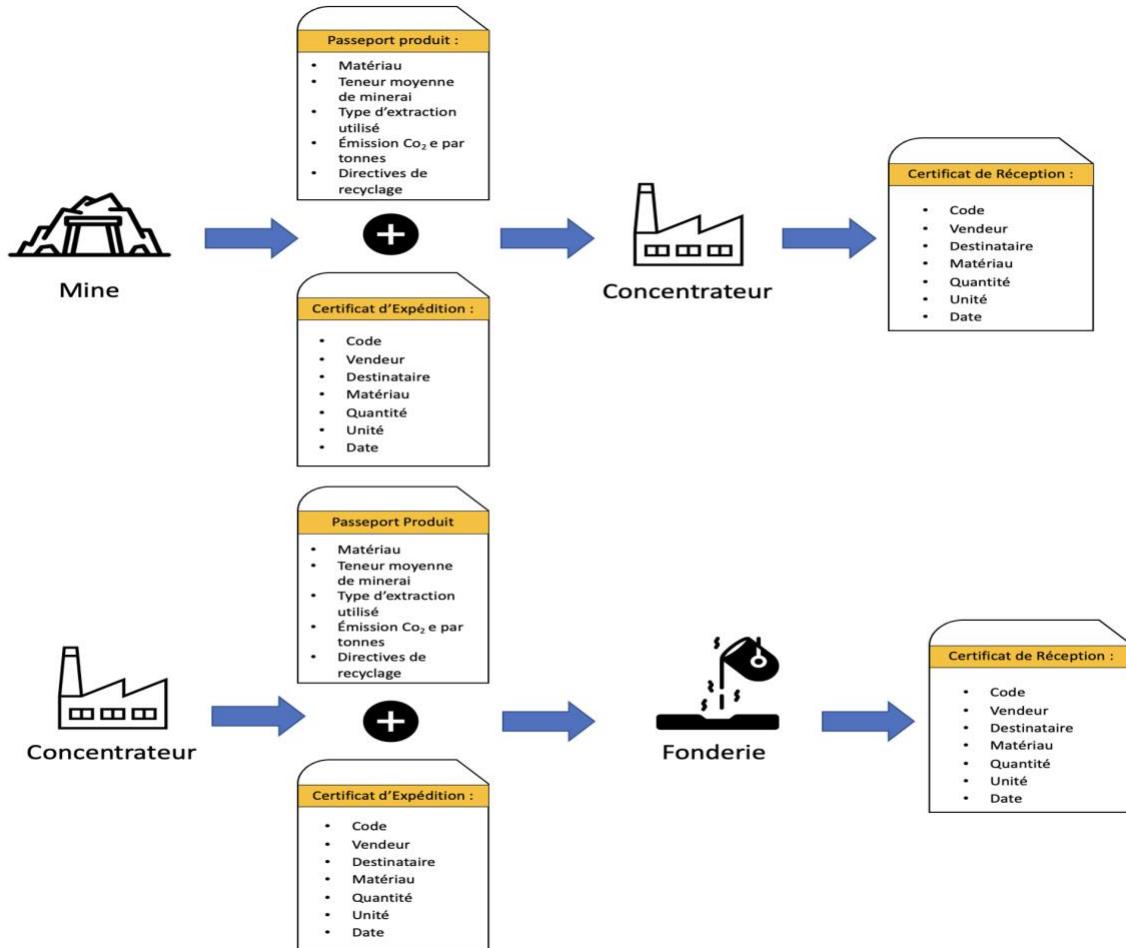


Figure 1.1 Début d'une chaîne d'approvisionnement minière. Source : Auteur

Dans le réseau complexe de l'exploitation minière, de nombreux acteurs jouent un rôle essentiel, chacun contribuant à différentes étapes du processus de production. Les fournisseurs de diverses régions géographiques sont des éléments essentiels de ce réseau complexe, ce qui nécessite leur identification explicite dans le cadre de la traçabilité. La collaboration de ces acteurs garantit un flux continu d'informations, améliorant ainsi la traçabilité globale et la responsabilité au sein de la chaîne d'approvisionnement. L'exemple de la Figure 1.1 décrit le genre d'informations nécessaires : code de transaction, nom du vendeur, nom du destinataire, type de matériau, quantité expédiée, unité, etc... Par ailleurs, L'implantation d'outils technologiques adaptés peut faciliter la collaboration en optimisant le flux d'informations entre les acteurs. Cet aspect sera discuté plus en détail dans la section suivante.

1.2.2 Diverses solutions de traçabilité

Avec l'avancée des innovations technologiques, on a aujourd'hui plusieurs façons efficaces de recueillir de l'information et de la traiter. Un inventaire sommaire de l'offre du marché peut être tiré de Statistiques Canada qui fournit les pourcentages des technologies de l'information et de la communication (TIC) utilisées par les entreprises au Canada en 2021 (Tableau 1.2). On s'intéresse uniquement à celles qui sont utilisables pour la traçabilité. On a retenu les concepts de solution infonuagique (45.3%), de technologies IoT (22.2%), de plateformes d'échanges de données sur Internet (EDI) (11.2%), de logiciels ERP (6.9%), de tag RFID (1.7%) et de technologie blockchain (0.3%) (Statistique Canada, 2020).

Tableau 1.2 Pourcentage d'utilisation des technologies de communication et d'informations par les entreprises au Canada en 2021. Adapté de (Statistics Canada, 2020)

Technologie	Pourcentage (%)
Réseau informatique d'entreprise	53.0
Logiciel non spécifique à l'industrie de l'entreprise	49.4
Logiciel spécifique à l'industrie	45.5
Informatique en nuage	45.3
Appareils intelligents connectés à Internet (IoT)	22.2
Logiciel de gestion de la relation client (CRM)	17.2
Logiciel open source	13.6
Échange de données informatisé sur Internet	11.2
Logiciel de planification des ressources d'entreprise	6.9
Logiciels et matériels utilisant l'intelligence artificielle	3.7
Étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID)	1.7
Analyse de données volumineuses (Big Data)	1.7
Impression 3D	2.0
Robotique avancée	0.9
Technologies de la blockchain	0.3
L'entreprise n'utilise pas de technologies de l'information et de la communication	14.7

Solution Infonuagique : Cette technologie représente la base même de plusieurs processus d'entreprises. En effet, il est l'un des outils les plus répandus sur le marché comme le montre bien le Tableau 1.2. Plutôt que de s'appuyer sur des serveurs physiques locaux, l'infonuagique permet d'accéder à des ressources informatiques telles que des serveurs, des bases de données, du stockage, et des logiciels, via Internet. Les services infonuagique courants sont les suivants (Mell & Grance, 2011) :

- **Infrastructure en tant que Service (IaaS)** : fournit une infrastructure informatique virtuelle telle que des serveurs et des machines virtuelles.
- **Plateforme en tant que Service (PaaS)** : offre une plateforme complète pour le développement, le test et le déploiement d'applications sans se soucier de l'infrastructure sous-jacente.
- **Logiciel en tant que Service (SaaS)** : donne accès à des applications logicielles hébergées dans l'environnement infonuagique, souvent via un abonnement.
- **Stockage en tant que Service (STaaS)** : fournit un stockage en ligne flexible et évolutif.

Ainsi, dans un exemple de traçabilité, on peut imaginer les employés à même de télécharger et partager des documents d'émissions de GES via une plateforme infonuagique. Ces fichiers sont ensuite stockés et accessibles à partir de différents appareils pour faire des analyses et des suivis.

IoT : en ce qui concerne l'internet des objets (IoT), elle est très répandue dans les industries manufacturières pour surveiller et optimiser les processus de production en temps réel, mais aussi dans les transports pour le suivi des véhicules, la gestion des expéditions, etc. Cela permet aux objets de collecter et de partager des informations, offrant ainsi des fonctionnalités intelligentes et une automatisation accrue. En d'autres termes, c'est l'idée que les objets peuvent être « intelligents » et interagir avec nous et d'autres objets grâce à une connexion à Internet.

En résumé, on peut avoir recours à un système qui utilise des capteurs pour enregistrer des données qui sont connectées à un ordinateur monocarte Raspberry Pi ou autres, responsable de les envoyer à un service infonuagique. La description complète se trouve au lien suivant <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. Les protocoles *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) ou *HyperText Transfer Protocol* (HTTP) sont souvent utilisés pour la transmission.

ERP (Enterprise Ressource Planning) : en matière de traçabilité, un autre outil très répandu est l'ERP. En effet, ce logiciel, lorsqu'il est implanté dans une entreprise, offre une visibilité complète sur le cycle de vie des produits, de l'achat des matières premières à la livraison. En outre, comme on peut le voir sur la Figure 1.2 plus bas, l'ERP se positionne comme le système le plus complet

capable de visualiser plusieurs types de données notamment à l'achat, à la production et à l'entreposage. Le logiciel ERP peut être composé de plusieurs modules comme la gestion des finances, la gestion des stocks, la gestion des ventes et achats, etc. Toutes ces fonctionnalités font de l'ERP un logiciel capable de gérer des flux importants de données.

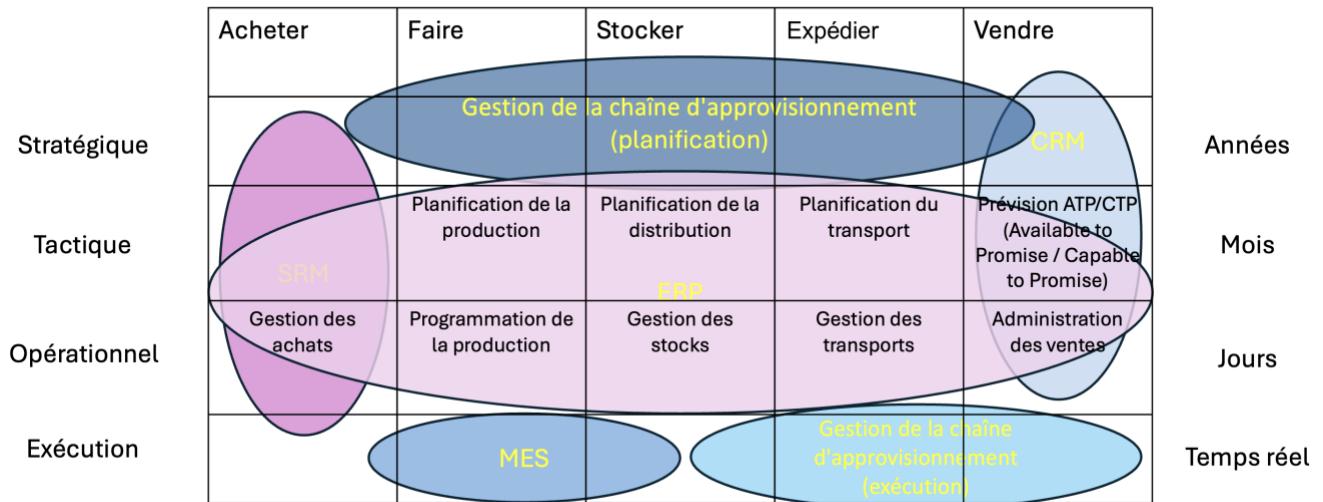


Figure 1.2 Représentation des fonctionnalités des différents logiciels de gestion. Adaptée de (Pellerin, 2023)

La blockchain (chaîne de blocs) : La technologie *blockchain*, ou chaîne de blocs, se distingue des systèmes traditionnels de gestion des données par sa capacité d'automatisation de certaines tâches tout en préservant les caractéristiques fondamentales telles que la décentralisation, l'immuabilité et l'intégrité des données. Rapidement, des applications potentielles ont émergé dans divers secteurs professionnels, notamment dans les établissements de santé, où la manipulation de dossiers renfermant des informations sensibles nécessite une confidentialité accrue. Cette technologie propose ainsi des solutions novatrices tout en assurant la sécurité des données.

En effet, en s'appuyant sur la cryptographie asymétrique et des mécanismes de consensus, la blockchain permet des transactions sécurisées sans qu'une seule entité ait un contrôle total sur le

système. On peut identifier des applications significatives dans des projets d'audit où l'objectif est d'assurer une traçabilité fiable.

1.2.3 Flux massifs de données

Le secteur minier se trouve clairement dans une phase de transition, où ceux qui maîtriseront et contrôleront efficacement leurs données seront mieux placés pour prendre l'avantage sur la concurrence. Cette maturité numérique est un excellent moyen de s'adapter très rapidement aux nouvelles réglementations qui sont de plus en plus exigeantes.

1.3 Enjeux de traçabilité des critères ESG dans l'industrie minière

Aujourd'hui, il est devenu un véritable défi de suivre les émissions et les performances de chaque étape de production dans l'industrie minière. En effet, chaque processus, peu importe le domaine, exige des systèmes technologiques performants et robustes. Il s'agit ici de solutions de bases de données, de capteurs IoT et de systèmes pilotes capables de générer des indicateurs de performances (voir section 1.2.2). Il est donc important de mettre en œuvre ces technologies afin d'améliorer l'efficacité et la transparence des opérations minières, tout en favorisant une meilleure gestion des données.

Toutefois, les sociétés minières demeurent souvent très discrètes concernant leurs procédés. En effet, ce milieu favorise des modes de partage parfois difficiles. Au Québec, on constate qu'une grande majorité de mines n'a pas encore atteint la maturité numérique nécessaire. En effet, d'après une étude réalisée par l'organisation CEFARIO en partenariat avec l'Institut National des Mines du Québec (INMQ), on trouve que « pour l'heure, la moyenne des mines qui ont participé aux entrevues se situe entre les niveaux traditionnel et discipliné ». Certaines mines utilisent des technologies numériques de manière minimale pour des opérations de base (**traditionnel**), tandis que d'autres ont mis en place des processus plus structurés et optimisés, bien que non automatisés ni prédictifs (**discipliné**) (Vaillancourt et al., 2019) (Figure 1.3).

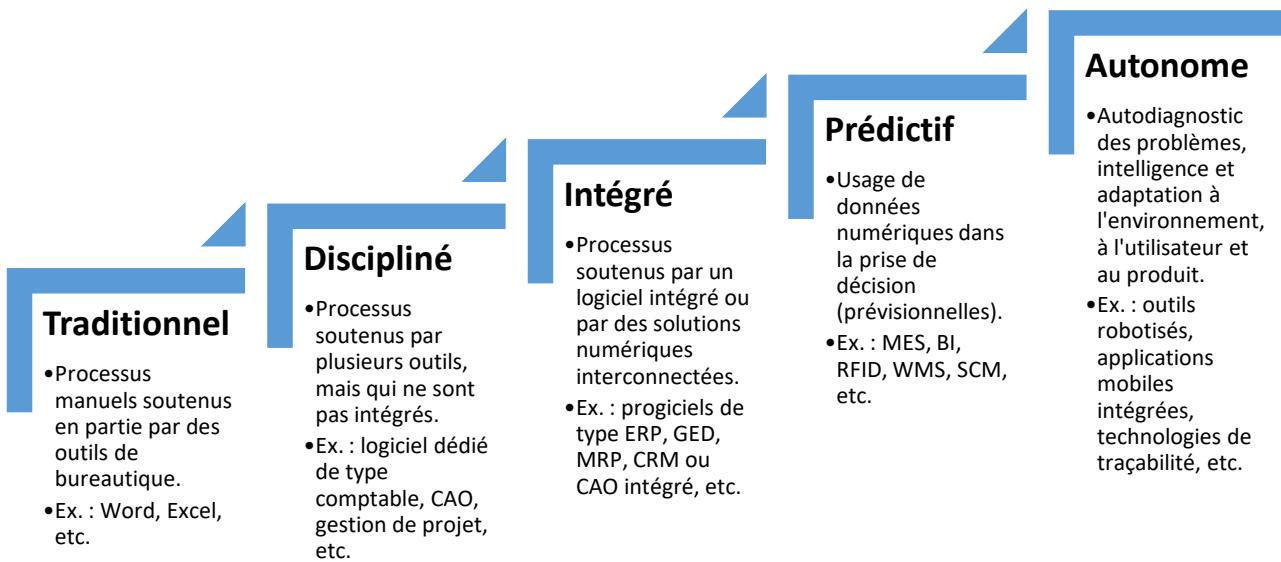


Figure 1.3 Image des différents niveaux de maturité numérique. Adaptée de (Vaillancourt et al., 2019, p. [18])

Ainsi, il est important qu'il y ait des apports et des investissements à long terme qui permettront aux mines de se situer à un niveau prédictif et autonome. On pense bien sûr à l'intégration de l'intelligence artificielle, mais aussi à des systèmes capables de tracer les données efficacement pour ne pas biaiser les analyses. Avant cela, il faut également cibler les zones d'amélioration, car il est important de respecter les choix et la vision de l'entreprise pour le futur.

Une mine possède beaucoup de critères où il est primordial d'être efficace et en norme. Plusieurs de ces critères sont énumérés dans le Tableau 1.3, plus précisément ce sont les critères auxquelles plusieurs mines québécoises ont dit accorder de l'importance pour être à jour technologiquement (Vaillancourt et al., 2019).

Tableau 1.3 Critères de décision importants qui justifient les investissements numériques dans les mines. Adapté de (Vaillancourt et al., 2019, p. [16])

Critères de décision	1 ^e mention	2 ^e mention	3 ^e mention	4 ^e mention
Santé et sécurité au travail (SST)	6	2	1	0
Retour sur investissement (ROI)	4	1	3	1
Efficacité	2	4	1	0
Obsolescence des équipements	0	2	0	0
Environnement	0	2	0	0
Stratégie	0	0	1	0
Réputation	0	0	1	0
Problématique	0	0	1	0
Main-d'œuvre	0	0	0	1

Cependant, avant de mettre en place de tels systèmes, il est essentiel de s'assurer qu'une étape de collecte de données structurée soit réalisée. De plus, avant de pouvoir manipuler ces données, il est nécessaire de suivre des processus bien définis.

La démarche utilisée dans le projet pilote sur la faisabilité d'un système de traçabilité pour l'extraction et la transformation du graphite coordonné par Propulsion Québec et Investissement Québec en est un exemple. Précisément, le rapport final du projet illustre les points importants pour la méthodologie et la collecte de données qui seront aussi utilisés dans le cas d'étude :

« Il importe alors de bien déterminer quelles données sont jugées « matérielles » (significatives) et doivent donc être « tracées ». Pour ce faire, il existe plusieurs normes internationales reconnues telles que celle du *GHG Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard [...]* » (Propulsion Québec, 2022)

En adoptant une approche numérique plus mature, les sociétés minières au Québec peuvent surmonter les défis liés à la confidentialité des procédés. La mise en place d'une méthodologie spécifique revêt une importance capitale pour recueillir de façon complète toutes les données du projet en respectant les impératifs de confidentialité.

Dans ce contexte, l'optimisation des processus requiert des systèmes technologiques avancés. Ces technologies offriront une vision approfondie des opérations minières, permettant ainsi une prise de décision plus éclairée. L'intégration de ces outils numériques contribuera non seulement à

accroître l'efficacité opérationnelle, mais aussi à encourager une transparence accrue au sein du secteur minier, malgré le fait que, comme mentionné en section 1.3, les entreprises minières partagent traditionnellement peu d'informations. Ces nouveaux outils pourraient progressivement surmonter cette réticence en facilitant un partage plus sécurisé et structuré des données. Cette transition vers des pratiques plus numériques ouvrira la voie à une meilleure gestion des données, renforçant ainsi la compétitivité et la durabilité des activités minières au Québec.

1.4 Objectif

Le présent mémoire examine en détail les possibilités de traçabilité des émissions de GES dans le secteur minier. Des technologies comme l'IoT et les ERP sont déjà en place et fonctionnent bien pour certains processus spécifiques. Toutefois, il existe de nombreux inconvénients pour la traçabilité à grande échelle. C'est pourquoi il est important d'évaluer les implications et les avantages que la traçabilité pourrait apporter à l'industrie minière, en particulier en ce qui concerne les émissions de GES. **L'objectif des présents travaux est de mettre en place une méthodologie et un outil de traçabilité efficace visant à évaluer la quantité de GES émise par chaque source d'émission.** Cette approche permettra de déterminer si cette méthode pourrait devenir un standard dans la déclaration des émissions de GES dans le secteur minier. Pour cela, elle devra répondre à plusieurs critères, tels que la fiabilité des calculs, la simplicité d'intégration dans les processus existants, la conformité aux régulations canadiennes, et la capacité à être adoptée par un grand nombre d'acteurs du secteur. En répondant à ces exigences, cette méthode favoriserait l'automatisation et la transparence des calculs des émissions.

Il importera de revisiter les concepts fondamentaux du suivi d'émissions de GES en soulignant leurs caractéristiques clés. Des solutions pouvant répondre aux besoins cités ci-dessus seront évaluées. De plus, il sera essentiel de mettre en lumière leur compatibilité avec d'autres technologies de l'Internet des objets (IoT) spécifiques aux mines, démontrant ainsi comment l'architecture adéquate peut être définie pour un écosystème minier en pleine mutation.

Un exemple concret de mise en œuvre sera exposé. Notamment, on se penchera sur le cas du complexe Amérique du Nord à La Corne de Sayona, une des mines de lithium les plus prometteuses

en Amérique Nord. Au travers de cette étude de cas, on mettra en évidence la capacité de la solution proposée à gérer le transfert de données et le calcul autonome d'indicateurs environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG), grâce à une plateforme décentralisée et sécurisée. Ainsi, le cas des mines est essentiel dans la transition vers une société plus durable, en particulier en fournissant les matériaux essentiels aux technologies vertes et à l'innovation industrielle de demain.

1.5 Plan du mémoire

Tout d'abord, au chapitre 2, on examinera les divers défis liés à la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre. Cette analyse approfondie servira de mise en contexte pour mieux comprendre le domaine. C'est une présentation des enjeux actuels et des caractéristiques nécessaires pour une solution de traçabilité efficace, tout en assurant une gestion sécurisée et fiable des flux de données.

Puis, au chapitre 3, on procédera à une revue de littérature afin de présenter la technologie blockchain ainsi que la traçabilité d'émissions de gaz à effet de serre. Il nous importera aussi d'expliquer la fusion entre ces deux concepts en illustrant des cas d'études concrets.

Ensuite, dans le chapitre 4, on expliquera en détail pourquoi on a choisi d'utiliser la blockchain pour la traçabilité des émissions de GES. On mettra en lumière les raisons qui font de la blockchain une solution viable à long terme pour cette problématique, en illustrant des concepts clés tels que l'immuabilité, l'intégrité et la transparence.

La méthodologie de suivi des émissions de gaz à effet de serre sera expliquée en détail dans le chapitre 5 afin de mieux comprendre les indicateurs importants du projet. De plus, on y présentera les résultats des émissions de GES qui en ont découlé.

Enfin, dans le chapitre 6 on élaborera un prototype blockchain concret capable de suivre et de gérer les émissions de GES dans un cas d'étude réel, afin de démontrer la pertinence de cette solution.

En conclusion, on fournira des recommandations sur la solution proposée et identifierons les défis et opportunités futurs dans ce domaine.

CHAPITRE 2 LIMITATIONS ET DÉFIS DE LA TRAÇABILITÉ DES ÉMISSIONS DE GES

Malgré le nombre de solutions technologiques déployées sur le marché, il n'est parfois pas simple de trouver celle qui concorde parfaitement avec le processus ciblé. C'est pourquoi dans ce chapitre on se penchera sur les aspects pertinents des outils de traçabilité des émissions de GES.

2.1 Gestion ergonomique de l'information

2.1.1 Automatisation

L'automatisation, définie comme étant « le terme qui décrit les applications technologiques où l'apport humain est minimisé [...] » (IBM, 2024), fait partie des caractéristiques qui rendent un système ergonomique. En effet, si on prend l'exemple d'une base de données SQL où l'on devait constamment mettre à jour les données, on perdrait une grande partie de l'efficacité du processus. L'automatisation est donc primordiale dans toute solution technologique. Si cela n'est pas encore instauré, il serait nécessaire d'évaluer plusieurs projets d'intégration en fonction des besoins et des différents types d'automatisation.

Il existe plusieurs différents types d'automatisation (Process Street, 2024) :

L'automatisation basique : implique l'utilisation d'outils pour simplifier les tâches routinières. Par exemple, un système de réponses automatiques pour traiter rapidement des courriels permettant ainsi aux employés de se concentrer sur des problèmes plus complexes.

L'automatisation des processus : vise à améliorer l'uniformité et la transparence des opérations en utilisant des logiciels spécialisés. Prenons le cas d'une demande de remboursement en ligne, le logiciel peut automatiquement vérifier les informations, calculer le remboursement et générer un ordre de transaction.

L'automatisation des intégrations : se concentre essentiellement sur le transfert de données entre différents systèmes ou applications. Elle permet aux informations d'être déplacées automatiquement d'un endroit à un autre, suivant différentes règles. Comme un site web qui collecte des données puis qui est automatiquement transféré à une base de données.

L'automatisation de l'intelligence artificielle (IA) : est le niveau le plus avancé jusqu'à présent. En effet, avec l'IA les machines peuvent apprendre à partir d'expériences passées. Cela permet aux machines de prendre des décisions de manière autonome. Les voitures autonomes avec des systèmes capables de changer de voie ou de s'arrêter à un obstacle sont un exemple.

À cet égard, il est pertinent qu'un système de traçabilité d'émissions de CO₂ soit doté d'automatisation pour être le plus efficace possible et éviter les tâches manuelles redondantes. Dans notre contexte, on aura recours en grande partie à de l'automatisation des processus et des intégrations.

Effectivement, en ce qui concerne l'automatisation des processus, l'outil doit être configuré de manière que, dès que les champs sont remplis, une étape de calcul des émissions de CO_{2e} soit déclenchée en utilisant les bons facteurs. Ensuite, une étape de stockage de ces informations doit être effectuée.

Pour l'automatisation des intégrations, il est important que l'outil de traçabilité des émissions de CO_{2e} soit capable de s'interconnecter efficacement avec d'autres systèmes déjà en place. Bien que le suivi des données soit important, l'analyse de celles-ci est tout aussi essentielle. Imaginons, que l'on souhaite créer un tableau de bord, il est nécessaire d'adopter le concept d'interopérabilité pour synchroniser les deux ensembles, permettant ainsi une utilisation fluide et complémentaire.

2.1.2 Différents degrés de visibilité

Dans l'univers de la science de la donnée, plus précisément de la programmation orientée objet, on est capable d'assurer l'intégrité des données via l'encapsulation (Debrauwer & Van der Heyde, 2020). Ce mécanisme permet de gérer des classes de données en masquant l'accès à des informations de différentes classes. La Figure 2.1 présente un exemple simple de diagramme de classe pour mieux comprendre la logique.

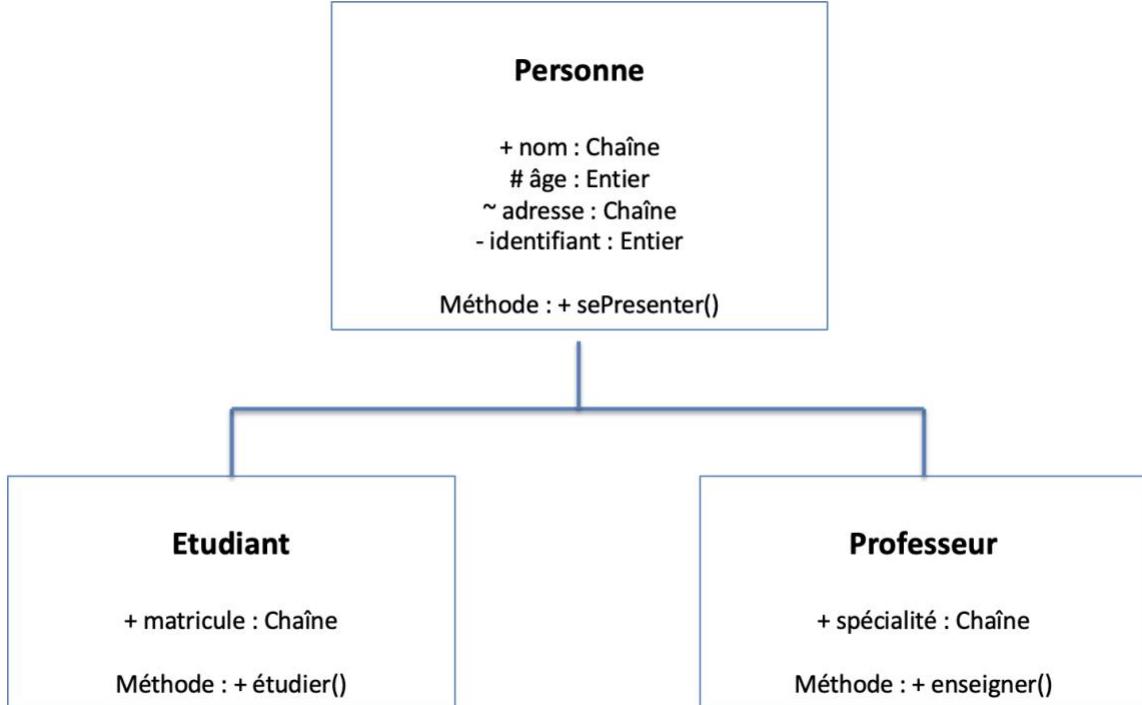


Figure 2.1 Représentation UML diagramme de classe

Dans cet exemple, on peut observer un diagramme de classe en Unified Modeling Language (UML) avec trois classes : Personne, Étudiant, et Professeur. La classe Personne possède plusieurs attributs avec différents niveaux de visibilité :

- nom (visibilité publique, indiqué par +, accessible à tous),
- âge (visibilité protégée, indiqué par #, accessible par la classe et ses sous-classes),
- adresse (visibilité de paquetage, indiqué par ~, accessible par les classes du même paquetage),
- identifiant (visibilité privée, indiqué par -, accessible uniquement par la classe elle-même).

La classe Personne dispose également d'une méthode publique, `sePresenter()`.

Les classes Étudiant et Professeur héritent de la classe Personne. La classe Étudiant ajoute un attribut public matricule et une méthode publique `étudier()`, tandis que la classe Professeur ajoute un attribut public spécialité et une méthode publique `enseigner()`.

Ainsi, on retrouve souvent cette notion de degrés de visibilité lorsque l'on fait de la traçabilité de données aussi. Cet aspect technologique vient ajouter une couche de fiabilité pour les utilisateurs d'une chaîne d'approvisionnement ou de quelconques autres processus. Cela optimise la visibilité des informations et vient réguler aussi l'accès à des informations.

Voici un exemple de cas d'utilisation: (Figure 2.2).

Publique	Transparent	Privé
<ul style="list-style-type: none"> Visible pour tout le monde sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> Visible pour la chaîne d'approvisionnement en aval 	<ul style="list-style-type: none"> Visible pour le fournisseur direct

Figure 2.2 Différents degrés de visibilité entre les acteurs d'une chaîne d'approvisionnement.

Source : Auteur

Ce principe assure la confidentialité des informations au sein du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Effectivement, si des informations sensibles comme la quantité expédiée et la provenance doivent être partagées, on devrait être capable d'attribuer des degrés de visibilité à des participants spécifiques.

2.1.3 Sécurité de l'information

La sécurité est primordiale pour tout développement d'outils technologiques que ce soit pour une application mobile ou encore un logiciel d'application professionnel. C'est un sujet très vaste qui peut traiter de plusieurs concepts de cybersécurité comme la sécurité des réseaux avec l'utilisation des pare-feu, des systèmes de détections d'intrusions et même de sécurité physique des infrastructures.

Étant donné que ces concepts s'écartent un peu du sujet de recherche, on se penchera dans cette partie uniquement de la sécurité qui touche directement à la couche application des systèmes de traçabilité dont les étapes sont présentées au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Liste des cadres de sécurité applicatives

01	Authentification	<ul style="list-style-type: none"> • Vérification de l'identité des utilisateurs • Gestion des mots de passe et sessions
02	Validation des entrées	<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance des injections (SQL) de code malveillant dans les champs • Filtrer les données injectées pour éviter les bugs
03	Gestion des erreurs et des exceptions	<ul style="list-style-type: none"> • Non-divulgation d'informations dans les messages d'erreurs
04	Cryptographie	<ul style="list-style-type: none"> • Encryption de la donnée pour assurer son intégrité • Sécuriser les protocoles de partage de données • Utilisation dans l'authentification
05	Contrôle d'accès	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation des accès aux informations sensibles • Implantation de rôles et de permissions

Selon la stratégie mise en place et l'architecture souhaitée, ces principes de sécurités peuvent varier.

D'un autre côté, le véritable défi réside dans la garantie de la fiabilité de l'application sur le long terme. Il est donc crucial d'effectuer des audits et des mises à jour régulières, au moins une fois par mois, afin de détecter tout événement inhabituel au niveau de l'application. Les meilleures pratiques de sécurité, des audits réguliers sont indispensables pour identifier les vulnérabilités et garantir la conformité avec les normes de sécurité (Stallings, 2019). En outre, la composante défensive de l'outil doit être opérationnelle en permanence pour contrer toutes les tentatives frauduleuses, tandis qu'un attaquant ou un bogue n'a besoin de réussir qu'une seule fois pour compromettre un système.

2.2 La chaîne d'approvisionnement

Le but ultime d'un système de traçabilité est d'avoir un suivi du producteur jusqu'au client final afin d'avoir une vision complète sur chacune des étapes. Ainsi, les organisations qui accordent une grande importance à l'approvisionnement responsable pourront vérifier si les produits à acheter

proviennent de sources équitables, légales et respectant les droits de la personne. Plusieurs entreprises comme Porsche ont déjà lancé des projets pour évaluer l'empreinte carbone de leur fabrication. En effet, l'entreprise allemande s'est fixé un objectif ambitieux d'être carboneutre sur l'ensemble de sa chaîne de valeur d'ici 2030 (Rudolph, 2022).

Ces projets, tout comme d'autres implantations d'envergure, présentent des défis majeurs, lesquels seront discutés dans les sous-sections suivantes.

2.2.1 Engagement de l'ensemble des acteurs

Le processus d'intégration d'un système pour une chaîne d'approvisionnement est complexe. Effectivement, à l'interne, lorsqu'une entreprise veut implanter un tel système, il faut impliquer les responsables de la conformité, des services informatiques et même des achats, et les convaincre de l'importance d'un projet de traçabilité. Souvent, il faut beaucoup de temps pour obtenir l'adhésion de ces différents départements, puis on doit également s'adresser aux fournisseurs de la compagnie en question (Figure 2.3). C'est pourquoi il est important de définir une carte complète de la chaîne d'approvisionnement jusqu'à l'utilisateur final.

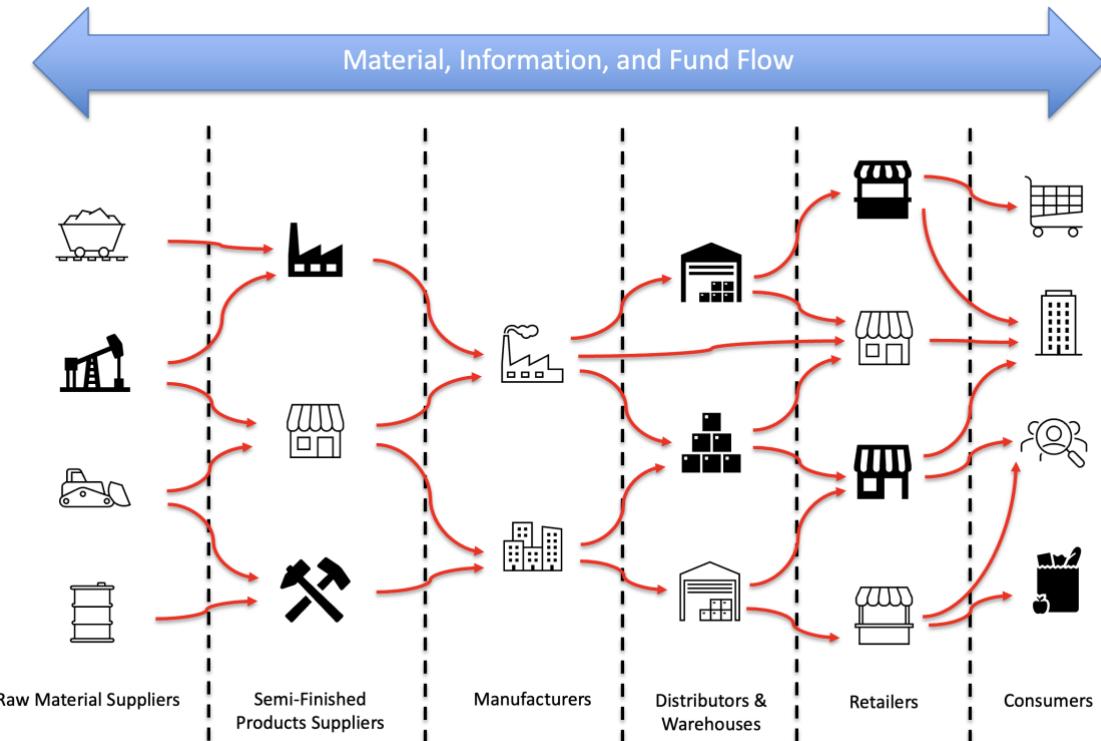


Figure 2.3 Exemple de représentation d'une chaîne d'approvisionnement complète. Adaptée de (Fang et al., 2018)

Plusieurs outils de cartographie peuvent être utilisés notamment Microsoft Visio, LucidChart ou bien des solutions professionnelles qui s'adaptent aux besoins du client comme IBM Supply Chain Insights, SAP Integrated Business Planning (IBP), etc. Ces outils permettent d'avoir une vision globale et de cibler les parties prenantes à intégrer en fonction de la stratégie de traçabilité.

2.2.2 Interopérabilité et architecture de données

Quand on parle d'architecture de données, il est important de penser à l'intégration avec les autres systèmes. C'est ce qu'on appelle l'interopérabilité. C'est la « capacité que possèdent des systèmes informatiques hétérogènes à fonctionner conjointement, grâce à l'utilisation de langages et de protocoles communs, et à donner accès à leurs ressources de façon réciproque » (Gouvernement

du Québec, 2024b). En effet, aucune application ne s'intègre bien à un processus si elle ne peut pas communiquer avec les autres dispositifs qui l'entourent.

Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser des normes de données standards comme l'*Extensible Markup Language* (XML) ou le *JavaScript Object Notation* (JSON) ainsi que des protocoles de communication très répandus tels que les *Application Programming Interfaces* (APIs). Effectivement, les APIs sont rapidement devenues les outils d'intégration les plus dominants notamment grâce à l'ascension de l'internet des objets (IoT). Elles ont pour objectif de faciliter les échanges de données entre les différents logiciels en utilisant les capacités du protocole *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) (Figure 2.4).

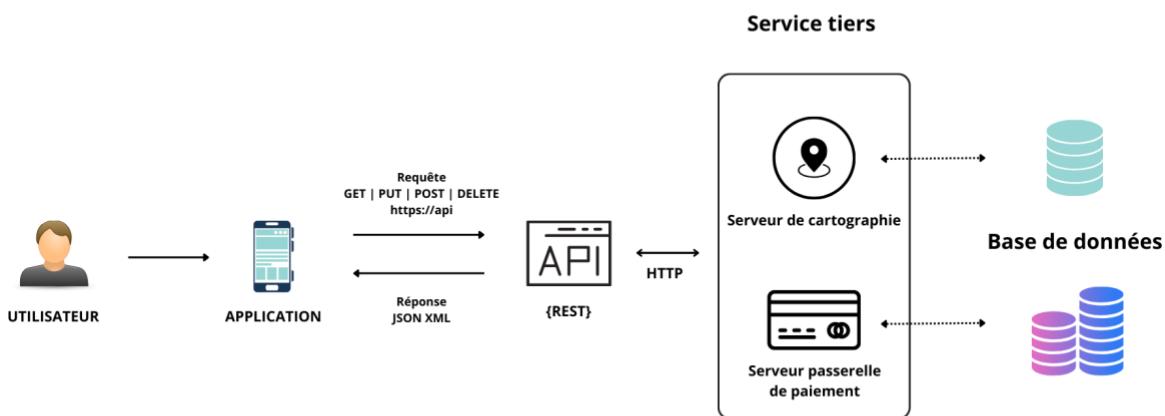


Figure 2.4 Schéma représentant la communication API REST. Adaptée de Canva.com

Cette structuration et manipulation de données permettent aux entreprises d'en retirer une importante valeur économique, mais aussi des prises de décisions plus éclairées, qui par la suite peuvent se transformer en avantages concurrentiels.

2.2.3 Manque de confiance

La confiance est un élément clé dans les relations entre grandes entreprises, en particulier lorsqu'il s'agit de gérer des questions liées à la concurrence et à l'antitrust. Les lois antitrust sont conçues pour prévenir les pratiques commerciales déloyales, telles que la collusion entre entreprises, la fixation des prix, ou encore l'abus de position dominante sur un marché (Gellhorn et al., 2004). Ces pratiques peuvent limiter la concurrence, nuire aux consommateurs, et mener à des sanctions juridiques importantes.

Pour éviter ces problèmes, il est crucial que les entreprises développent des réseaux fiables et respectent des standards rigoureux en matière de gestion des données. En instaurant des règles strictes pour la collecte, l'utilisation et le partage des données, les entreprises réduisent les risques d'enfreindre les lois antitrust, tout en renforçant la transparence et la responsabilité. Un contrôle rigoureux sur la manière dont les informations sont manipulées permet d'éviter des pratiques déloyales, telles que la discrimination de certains acteurs du marché ou l'exclusion de concurrents.

De nos jours, de nombreuses entreprises ont recours aux services infonuagiques pour partager des informations en temps réel. Cependant, le principal inconvénient de cette solution est que l'information est centralisée, ce qui peut susciter une certaine réticence. Cette centralisation peut susciter une réticence de la part des entreprises, en particulier celles qui traitent des informations sensibles ou stratégiques, car elles peuvent être préoccupées par la sécurité des données, le contrôle limité sur leur stockage, et les risques de dépendance vis-à-vis d'un seul fournisseur. En effet, il est difficile de croire que toutes les entreprises se partagent mutuellement des informations confidentielles sur ce type de plateforme. Toutefois, il existe d'autres possibilités telles que les systèmes décentralisés, par exemple la *blockchain*, afin d'obtenir un suivi prometteur sans qu'aucune entité ne contrôle le réseau. Ce type de projet favoriserait la validation des données d'un point de vue éthique.

2.3 Comparaison système centralisé vs décentralisé

2.3.1 Analyse de l'existant

Les réseaux centralisés et décentralisés peuvent être choisis spécifiquement pour les besoins d'un organisme ou d'un réseau. Les systèmes centralisés qui sont, jusqu'à maintenant beaucoup plus populaires et utilisés (Statistics Canada, 2020), permettent une implantation rapide et efficace de diverses solutions technologiques. Parmi les grands fournisseurs, on retrouve Amazon, Google, Microsoft ou encore IBM qui proposent en grande partie des solutions centralisés. Effectivement, beaucoup de projets et protocoles informatiques ont été réalisés favorisant l'accès à leurs différents services pour des prix très avantageux, notamment avec les services infonuagiques et les logiciels d'entreprises comme Microsoft Teams. Cela confirme en quelques sortes le mode de fonctionnement de la plupart des entreprises du monde professionnel. En d'autres termes, on favorise l'accès et le partage de données avec des partenariats en devenant consommateur de ces moyens technologiques.

Quant à elles, les solutions décentralisées sont beaucoup moins propagées sur le marché international. Cependant, il existe un fort engouement autour de ces technologies plus particulièrement autour de la *blockchain*. En effet, d'après une étude, le nombre de publications indexées dans la base de données Google Scholar référençant le terme « *centralized/centralised ledger* » est de 1260, tandis que pour « *decentralized/decentralised ledger* », le nombre de publications scientifiques est de 6540 (Lupaiescu et al., 2022). De plus, selon Statista « la part de marché mondial de la blockchain était évaluée à 1,57 milliard de dollars américains en 2018 et devrait croître de plus de cent fois pour atteindre 163 milliards de dollars américains d'ici 2027 » (Statista, 2023). En effet, Il est encore nécessaire de traverser une phase d'apprentissage, où des efforts sont déployés pour rendre la technologie *blockchain* aussi accessible et compréhensible que possible.

2.3.2 Différences des caractéristiques

Un tableau a été élaboré afin de comparer les critères importants des deux types de solutions. Pour ce faire, plusieurs articles universitaires ont été utilisés (Lupaiescu et al., 2022) (Mendi et al., 2020)

(Puthal et al., 2018) (Tableau 2.2). Le but de ce tableau est de montrer les points importants pour distinguer dans quels cas il faut centraliser ou décentraliser les processus.

Tableau 2.2 comparatif entre les deux types de réseaux centralisé et décentralisé. Inspiré de (Lupaiescu et al., 2022) (Mendi et al., 2020) (Puthal et al., 2018)

Caractéristiques	Réseau décentralisé	Réseau centralisé
Dépendance	Pas de dépendance avec un tiers acteur	Forte dépendance envers les administrateurs du réseau
Contrôle de la donnée	Au niveau de l'utilisateur	Contrôlé par l'autorité centrale
Flux de données	Vertical	Ouvert vers n'importe quels nœuds
Vitesse de transactions	Moins rapide	Très rapide
Immuabilité	Données immuables	Personnes spécifiques peuvent modifier ou supprimer certaines données
Robustesse	Très robuste face aux attaques et fonctionne en tout temps	Sensible aux fuites de données et la maintenance met à l'arrêt le système
Facilité d'utilisation	Difficile	Simple

En somme, il est important de savoir ce que l'on veut améliorer ou optimiser. Dans les cas où l'on veut que le processus traite certaines tâches rapidement, opter pour une solution centralisée serait le bon choix puisque l'implantation et même le fonctionnement sont plus rapides que les systèmes décentralisés. D'un autre côté, lorsque l'on cherche à prôner la sécurité et le partage d'informations, le système décentralisé est plus adéquat. En effet, la particularité de pouvoir partager des données immuables sans tierce partie fait de celui-ci un bon outil pour des projets dans les secteurs comme la signature de contrat ou encore l'audit des chaînes d'approvisionnement. Une étude faite par Transforma Insights prévoit que les audits de la chaîne d'approvisionnement dépasseront les 103 milliards de dollars américains d'ici 2030. Cette projection représente une croissance de plus de 102 milliards par rapport à l'année 2020 (Figure 2.5) (Transforma Insights, 2021).

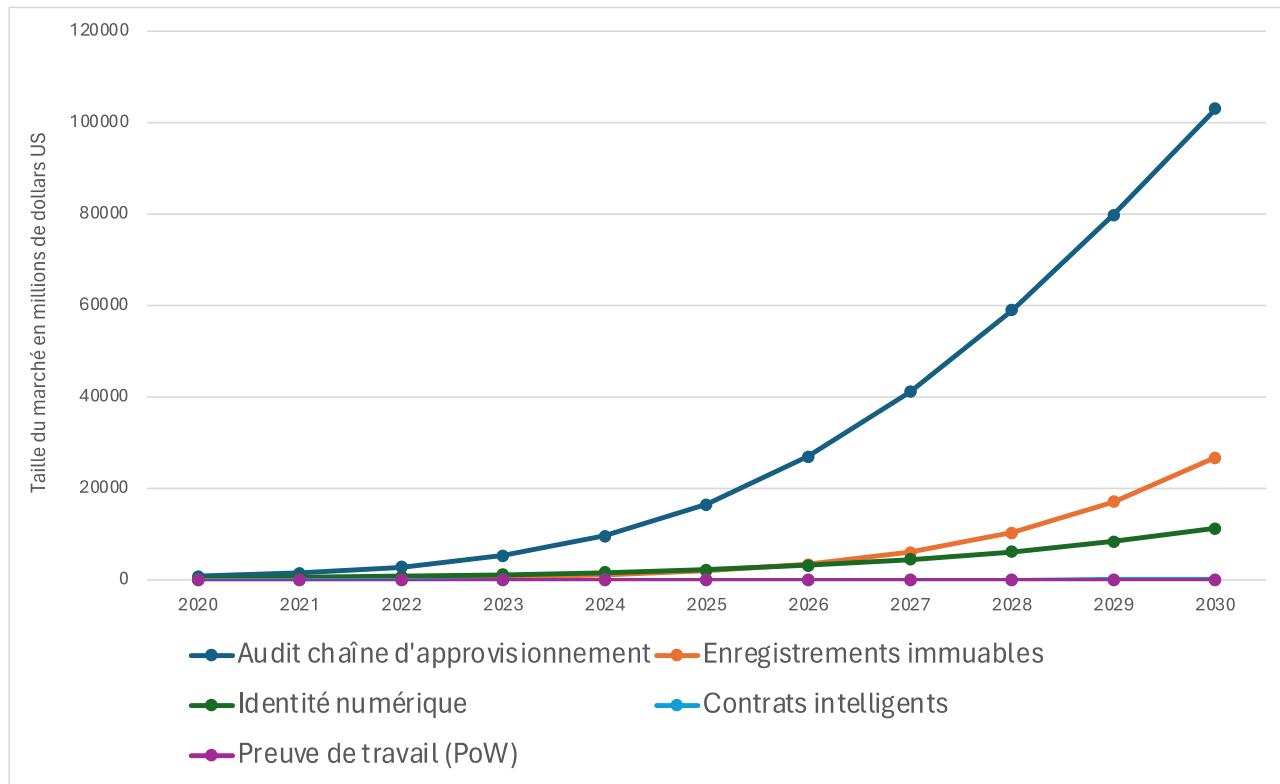


Figure 2.5 Taille du marché mondial des systèmes décentralisés par études de cas. Adaptée de (Transforma Insights, 2021)

Ainsi, c'est pourquoi ce mémoire vise à évaluer l'utilisation de la blockchain pour la traçabilité des émissions de CO₂ dans la chaîne d'approvisionnement, ce qui pourrait faciliter les audits de ces indicateurs à l'avenir.

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans un contexte où le développement durable suscite un intérêt croissant, de nombreux articles scientifiques explorent des thèmes similaires au sujet de recherche présenté dans ce mémoire. Cependant, pour le présent travail, il est essentiel de définir de nouvelles variables ayant un impact sur la spécificité de la technologie *blockchain*. La plupart des travaux existants se concentrent sur des observations faites à l'étranger, principalement en Europe. L'approche distincte présentée ici consiste à combiner les aspects de traçabilité et de blockchain avec les émissions de carbone spécifiques au secteur minier.

Les articles sur la *blockchain* et la chaîne d'approvisionnement sont assez nombreux. Par conséquent, il est nécessaire de se concentrer uniquement sur les études les plus pertinentes. Plus de 5 000 études générales sur la *blockchain* ont été examinées, et seules celles offrant des informations spécifiques et détaillées en lien avec le cas d'étude ont été retenues pour approfondir l'analyse. Cela permettra de comprendre les avantages et inconvénients de l'utilisation de cette technologie pour les entreprises. On analysera également quelques articles présentant des projets de démonstration de faisabilité pour aider les entreprises à améliorer leur traçabilité des émissions de carbone (très peu d'articles).

3.1 Suivi des émissions de GES

Le suivi des émissions de GES a suscité un important intérêt global. Avec le réchauffement climatique qui est devenu une grande préoccupation environnementale les politiques mises en place ont poussé les entreprises manufacturières à investir dans des projets de recherche leur permettant de suivre de près leurs émissions de carbone (Jiang et al., 2024). Il est donc très important de se concentrer sur ce secteur de développement pour les industries les plus énergivores pour mieux gérer leurs consommations et être conforme. « Selon (Hu & Man, 2023) obtenir des résultats de prévision précis est la clé pour contrôler et optimiser la consommation énergétique industrielle et les émissions de carbone ».

3.1.1 Types d'émissions

Il existe une variété significative de types d'émissions de gaz à effet de serre. Il est très courant de les classifier en fonction de trois niveaux : *scope 1*, *scope 2* et le *scope 3* (Pandey et al., 2011). En effet, pour simplifier la compréhension des normes et classifications des types d'émissions GES comme ISO (14067) ou encore GHG protocole utilisent ces trois différentes envergures pour classer les émissions de GES. Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques des trois niveaux (Hertwich & Wood, 2018) :

Tableau 3.1 Description des trois catégories de scopes

Niveaux	Description	Exemples
SCOPE 1	Émissions directes de consommation d'une organisation	<ul style="list-style-type: none"> - Véhicules de service, camions, pelles, etc. - Équipements : machines, convoyeurs, ventilateurs, etc. - Consommables : diesel, explosifs, réactifs ou éléments chimiques utilisés - Chauffage : combustion fixe
SCOPE 2	Émissions indirectes liées à la consommation d'énergie	GES de la source d'énergie : électricité
SCOPE 3	Émissions indirectes externes à l'organisme autant en amont qu'en aval de la chaîne d'approvisionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Productions des équipements et matières premières des fournisseurs - Transport des employés - Achats de services et marchandises

Dans chacun de ces scopes on peut retrouver différentes sources d'émissions. On peut avoir différentes sources selon le secteur d'application. Pour avoir un aperçu, prenons l'exemple de l'institut national de recherche basé à Montréal (Institut national de la recherche scientifique (INRS) et al., 2020). Selon leurs résultats, leurs principales sources sont :

- la consommation énergétique des bâtiments : le chauffage au gaz naturel (GN) et l'électricité;
- la combustion fixe provenant des génératrices;
- les fuites d'halocarbures ou émissions fugitives liées à l'utilisation des équipements de réfrigération et de climatisation;
- la combustion mobile provenant des automobiles et camions;
- les déplacements professionnels;
- les émissions liées aux bâtiments loués à des tiers;
- les gaz de laboratoire;
- les approvisionnements (produits et services achetés);
- la gestion des matières résiduelles et eaux usées;

La liste ci-dessus concerne des laboratoires de recherches et, donc, si l'on voulait faire des calculs concernant d'autres industries plus spécifiques comme des usines d'aluminium ou encore de fonderie (Suárez & Minerals, Metals and Materials Society, 2012), les sources et techniques de calcul pourraient varier.

3.1.2 Outils de gestion

En ce qui concerne les outils de gestion des émissions de GES, beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières années, concernant les nouvelles formes de calculs pour réduire les incertitudes (Pandey et al., 2011) ou même de système complet permettant d'évaluer l'empreinte carbone totale d'une organisation (Azarkamand et al., 2020). En effet, il existe des cas d'études spécifiques à beaucoup de secteurs comme la construction (Yan et al., 2022), l'expédition (Patel et al., 2023), le tourisme (Cao et al., 2023) , etc.

Le principal atout de ce genre d'innovation est de permettre à l'utilisateur d'automatiser les calculs d'émissions en quelques clics. Les logiciels sont dotés de plusieurs sources de données et

algorithmes qui renvoient les résultats en fonction des champs entrés par l'utilisateur. Grâce à de tels outils, on peut estimer des émissions par jour par produit ou même par procédé, ce qui permettra de prendre de meilleures décisions pour réduire son empreinte carbone.

3.1.3 Réglementations

Comme mentionné précédemment, l'évolution des réglementations environnementales est grandissante. En effet, le gouvernement fédéral du Canada a examiné cinq règlements conçus pour réduire les émissions de gaz à effet de serre touchant les secteurs des transports, de l'électricité et du pétrole (*La réduction des émissions par la réglementation des gaz à effet de serre - Environnement et changement climatique Canada, 2023*). Pour suivre ces nouvelles réglementations, les audits du bureau du vérificateur général du Canada ont pour but de s'assurer que les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre canadiens soient atteints conformément aux objectifs d'atténuation à long terme.

Par ailleurs, il existe d'autres audits qui surveillent les seuils d'émissions des entreprises, notamment pour la déclaration des émissions obligatoires. Au Canada, il faut faire une déclaration au gouvernement fédéral et au gouvernement provincial. Effectivement, quelques différences existent entre les deux en ce qui concerne les facteurs d'émissions pour les calculs d'émissions de GES, mais en règle générale elles restent très similaires. Pour les deux cas, il est demandé d'effectuer sa déclaration d'émissions de gaz à effet de serre à partir du seuil de 10 000 tonnes de CO₂e par an (Gouvernement du Canada, 2024b). Au Québec, les entreprises ont jusqu'au 1^{er} juin de chaque année pour soumettre leur déclaration (Gouvernement du Québec, 2024a).

3.1.4 Tendances

Lorsque l'on cherche des articles scientifiques concernant les déclarations et le suivi des émissions de GES dans des bases de données comme *Web of science*, on remarque une croissance sur les cinq dernières années avec un total de plus de 3000 articles rédigés sur le sujet. Pour effectuer cette recherche, une combinaison de mots-clés tels que "greenhouse gas emissions," "carbon tracking," "GHG reporting," et "emissions estimation methods" ont été utilisés. Ces termes ont été combinés avec des opérateurs booléens ("AND," "OR") pour affiner les résultats et capturer les études les

plus pertinentes. Le nombre d'articles de recherches augmente de 150 par an notamment sur de nouvelles méthodes d'estimations de calculs d'émissions de GES (Yañez et al., 2019). Mais ces articles sont pour la plupart très spécifiques sur un secteur en question, il reste encore beaucoup de recherche à faire sur ce sujet allant plus en détail sur les calculs.

3.2 Technologie de la Blockchain

Lorsque l'on effectue des recherches sur la technologie *blockchain*, un grand nombre de ressources et de résultats sont disponibles. Dans cette partie on présentera des articles qui nous permettront d'avoir une meilleure compréhension de la technologie.

3.2.1 Définition

La *blockchain* se distingue par ses caractéristiques uniques, à savoir : l'immutabilité, la transparence et l'anonymat (Ghiro et al., 2021). L'immutabilité assure la sécurité en empêchant toute altération des données, bien que cela nécessite une consommation de ressources importante. La transparence offre une visibilité totale des transactions, tandis que l'anonymat renforce la confidentialité pour les utilisateurs en rendant difficile leur identification. En résumé, la blockchain est une technologie de registre distribué qui garantit la sécurité, la transparence et la confidentialité des données.

Exemple :

Soit un groupe de collaborateurs travaillant ensemble sur un projet. Au lieu de stocker toutes leurs données sur un seul ordinateur, ils choisissent de créer des copies de leur base de données et de les distribuer à chaque membre du groupe. Tous les membres possèdent donc une copie identique et à chaque fois que l'on ajoute une nouvelle information cette dernière est enregistrée sur toutes les copies simultanément.

3.2.2 Exemple de fonctionnement

La plus grande particularité de la blockchain repose sur le fait qu'on vient enregistrer des données dans ce qu'on appelle des *blocks* qui sont reliés par des signatures cryptographiques *hash* (**Kok**,

2019). Cette méthode crée un système décentralisé où chaque membre peut vérifier les transactions en comparant ces signatures cryptographiques. Cela assure la transparence et la sécurité des données, car il devient difficile de falsifier des informations lorsque chaque copie de la base de données est en accord avec toutes les autres.

La décomposition du fonctionnement de la *blockchain* en plusieurs parties {le *hash*, le bloc, la chaîne de blocs, la chaîne distribuée) en simplifie la description.

Le *Hash* :

Une fonction *hash* est un algorithme qui modifie l'entrée des données d'une longueur aléatoire en une sortie hexadécimale de taille fixe (Bray, 2020). C'est une fonction très utilisée en cryptographie qui permet de garantir l'intégrité des données. En effet, elle peut être utilisée pour crypter les données de mot de passe dans une base de données afin de se protéger en cas de compromission des données. Il existe plusieurs types de fonctions *hash*, le Tableau 3.2 présente une liste de quelques-unes de ces fonctions avec leurs propriétés.

Tableau 3.2 Tableau représentant les quatre fonctions de hachage les plus courantes. Inspiré de (GCHQ, 2024)

Fonction	Caractéristiques	Exemple
MD5 (Message Digest Algorithm 5)	Hachage de 128bits (16 octets)	Hello world -> 3e25960a79dbc69b674cd4ec67a72c62
SHA-1 (Secure Hash Algorithm 1)	Hachage de 160bits (20 octets)	Hello world -> 7b502c3a1f48c8609ae212cdfb639dee39673f5e
SHA256 (Secure Hash Algorithm 256)	Hachage de 256bits (32 octets)	Hello world -> 64ec88ca00b268e5ba1a35678a1b5316d212f4f366b2477232534a8aec37f3c
SHA512 (Secure Hash Algorithm 512)	Hachage de 512bits (64 octets)	Hello world -> b7f783baed8297f0db917462184ff4f08e69c2d5e5f79a942600f9725f58ce1f2 9c18139bf80b06c0fff2bdd34738452ecf40c488c22a7e3d80cdf6f9c1c0d47

Ce qu'il faut retenir c'est que plus la taille est importante, plus le *hash* est sécuritaire. En effet, les fonctions MD5 et SHA-1 sont beaucoup moins utilisées en raison de leur vulnérabilité. La fonction SHA256 est celle qui est recommandée dans la plupart des protocoles de sécurité actuels.

Le Bloc :

La prochaine étape est représentée par un bloc. Lorsqu'on communique avec un réseau blockchain pour émettre une transaction, on doit fournir certaines informations comme l'adresse d'envoi ou

de réception, le montant et d'autres informations de transactions qui forment toutes ensemble le bloc (Figure 3.1).

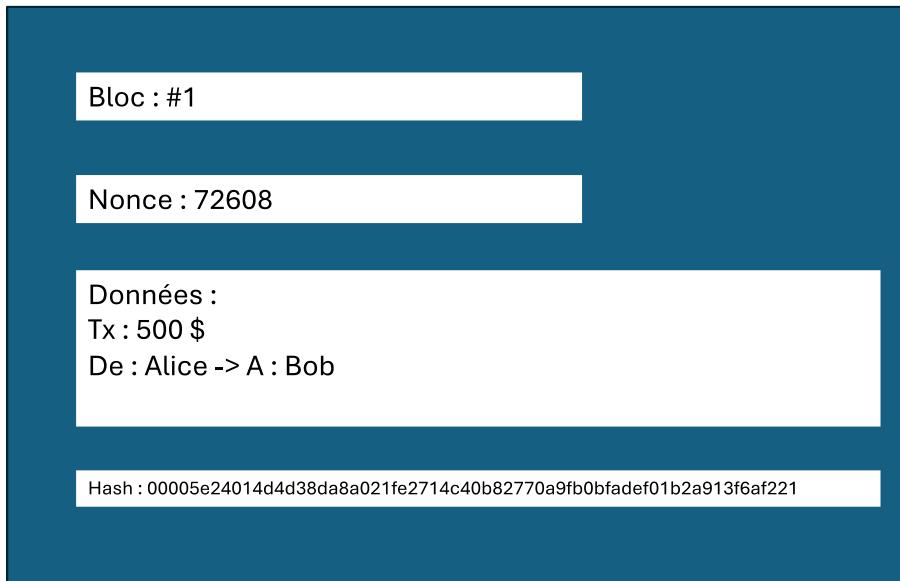


Figure 3.1 Exemple simplifié d'un bloc de la blockchain

Le Nonce :

Dans la Figure 3.1, on peut voir une composante appelée le *nonce*, qui constitue une couche de sécurité supplémentaire pour chacun des blocs d'une blockchain. En effet, lorsqu'on souhaite calculer la signature cryptographique d'un bloc (*hash* ci-dessus), on peut définir des règles pour rendre plus complexe la détermination de ces signatures. Elles sont caractérisées par le nombre de zéros au début de la signature, comme dans notre exemple où il y en a quatre.

Hash **00005e24014d4d38da8a021fe2714c40b82770a9fb0bfadef01b2a913f6af221**

Figure 3.2 Explication du nonce

Par exemple, pour qu'un *hash* soit valide dans la blockchain Bitcoin, il doit commencer par 18 zéros (Kok, 2019). En d'autres termes, le *nonce* représente le nombre d'itérations que l'on a effectuées progressivement jusqu'à ce qu'on trouve une signature cryptographique qui respecte cette règle du nombre de zéros. Dans l'exemple ci-dessus, nous avons dû itérer 72 608 fois avant d'obtenir une signature qui commence par quatre zéros.

Les Mineurs :

Les mineurs dans un réseau blockchain sont des participants qui utilisent leur puissance de calcul informatique pour valider et sécuriser les transactions en les regroupant dans des blocs, puis en ajoutant ces blocs à la chaîne de blocs. Le processus par lequel les mineurs ajoutent des blocs à la *blockchain* est appelé "minage". Ce sont eux qui sont responsables du fonctionnement du réseau et qui calculent les signatures (*hash*) et le bon nonce pour qu'un bloc soit valide. Cette opération prend environ 10 minutes aux bons mineurs afin de valider un bloc.

La Chaîne de blocs :

Pour faire une *blockchain*, on doit relier chacun des blocs entre eux. En effet, chacun des blocs contient les signatures cryptographiques des blocs précédents pour les relier entre eux (Figure 3.3).

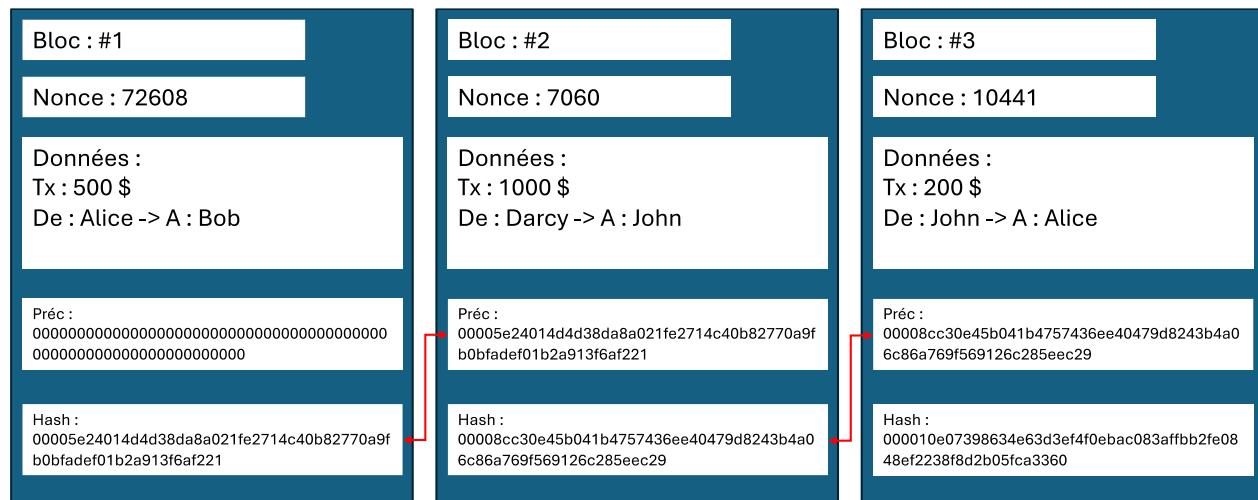


Figure 3.3 Exemple simplifié d'une chaîne de blocs

C'est l'un des éléments qui instaure une certaine fiabilité sur les informations partagées. Par exemple, si un acteur frauduleux voulait modifier les informations des blocs cela rendrait toute la chaîne de blocs fausse.

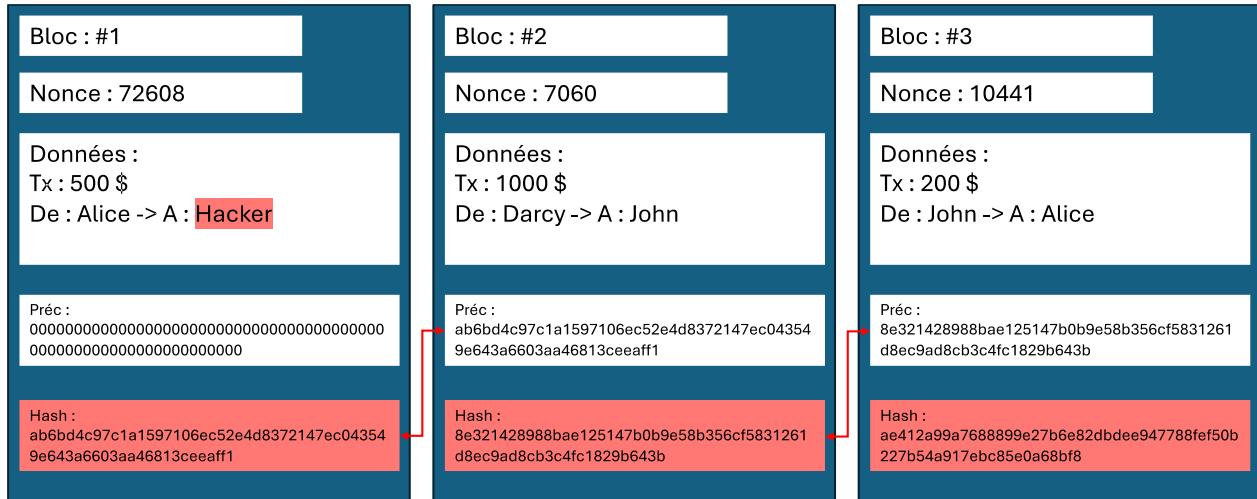


Figure 3.4 Représentation d'une chaîne de blocs fausse

Lorsqu'une attaque se produit dans un réseau de *blockchain* et qu'un mineur tente de modifier un bloc validé, cela invalide automatiquement les signatures et les informations contenues dans les blocs suivants. Pour remédier à cette situation, le *pirate* doit non seulement recalculer la signature du bloc attaqué, mais aussi recalculer toutes les signatures cryptographiques de la chaîne pour s'assurer de leur cohérence. Cette caractéristique rend le réseau résistant aux attaques de 51 %, car un attaquant serait obligé de rivaliser avec tous les autres mineurs du réseau, qui ajoutent des blocs toutes les minutes. Être résistant aux attaques de 51 % signifie qu'un attaquant doit contrôler plus de la moitié de la puissance de calcul totale du réseau pour manipuler la blockchain. Cela rend extrêmement difficile, coûteux et peu probable pour une entité malveillante de réussir une telle attaque, car la puissance de calcul nécessaire serait énorme.

Par conséquent, le réseau rejette systématiquement une chaîne de blocs falsifiés et ne la reconnaît pas comme légitime. Cette résilience repose sur le consensus décentralisé du réseau, où la majorité des mineurs doivent se mettre d'accord pour valider les transactions et maintenir l'intégrité de la blockchain.

Chaîne de Blocs distribués :

Une *blockchain* devient distribuée lorsque la même copie de celle-ci est partagée sur tout le réseau, comme illustré dans la Figure 3.5. Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre comment un réseau blockchain parvient à un consensus pour valider les transactions.



Figure 3.5 Exemple réseau chaîne de blocs distribués

Par exemple, la cryptomonnaie Bitcoin utilise le mécanisme de consensus *Proof of Work* (PoW), qui sera détaillé dans les prochaines sous-sections. Ce mécanisme est crucial pour sécuriser les transactions sur la blockchain. Lorsqu'Alice et Bob s'envoient des montants d'argent sur le réseau Bitcoin, des informations telles que le montant et les adresses de destination doivent être entrées dans le système. Ces transactions sont ensuite validées par le mécanisme de consensus, assurant qu'elles sont ajoutées à la chaîne de blocs partagée par tous les nœuds du réseau.

3.2.3 Mécanisme de consensus

Une des principales particularités lorsque l'on veut développer une solution *blockchain* réside dans le choix du mécanisme de consensus. Avec sa nature décentralisée, où aucune entité unique n'alimente et ne contrôle l'ensemble du réseau, la difficulté de se mettre d'accord sur les données à ajouter à un réseau décentralisé constitue un obstacle important à la mise en œuvre de ces réseaux à grande échelle. C'est là que les mécanismes de consensus entrent en jeu. Il s'agit d'algorithmes qui permettent aux participants (mineurs) d'une chaîne de blocs de parvenir à un accord commun et d'aboutir à une version unique de l'historique des transactions (Xie et al., 2023). Surmonter ce

défi a ouvert la voie aux projets de blockchain. Il était nécessaire de s'assurer que tous les agents d'un système soient d'accord sur une source unique de vérité.

Actuellement, les algorithmes *Proof of Work* (PoW) et *Proof of Stake* (PoS) sont les plus populaires pour le développement des cryptomonnaies et des blockchains, mais ils présentent des imperfections notables. Par exemple, le PoW nécessite une quantité massive de puissance de calcul pour valider les transactions et sécuriser un registre distribué qui est immuable, décentralisé et transparent. Cela engendre des coûts énergétiques élevés, un problème particulièrement mis en lumière dans des réseaux comme celui de Bitcoin où la consommation d'électricité devient une préoccupation environnementale majeure (Narayanan et al., 2016).

D'un autre côté, le PoS fonctionne différemment en attribuant la validation des transactions à des participants en fonction de la quantité de cryptomonnaie qu'ils détiennent et "mettent en jeu" (stake). Bien qu'il soit plus économique en énergie que le PoW, le PoS comporte ses propres risques. Par exemple, des acteurs malveillants qui possèdent une quantité importante de jetons pourraient théoriquement avoir plus d'influence sur le réseau, augmentant ainsi les risques de piratage ou de manipulation. Pour contrer cela, des mécanismes d'incitation sont mis en place pour encourager les participants à agir dans l'intérêt du réseau (Nguyen et al., 2019). Ces incitations sont essentielles pour garantir la sécurité et la stabilité des réseaux blockchain basés sur le PoS.

En raison des désavantages des mécanismes actuels (PoW, PoS), de nombreux nouveaux algorithmes de consensus ont été développés, et des recherches sont en cours pour augmenter la vitesse des systèmes blockchain tout en maintenant un haut niveau de sécurité. Par exemple, le « *Weighted Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)* » est un algorithme de consensus conçu pour résoudre le problème des généraux byzantins. Ce problème théorique implique de parvenir à un accord sur un réseau, même si certains participants agissent de manière malveillante ou défective. Cet algorithme vise à réduire la latence du réseau (Lei et al., 2022). D'autre part, le « *Quantum Zero-Knowledge Proof* » propose un nouveau moyen de réduire la consommation énergétique des blockchains tout en préservant leur sécurité (Wen et al., 2022).

3.2.4 Architecture

Cette section illustre un exemple d'architecture classique *blockchain IoT*. Le système global assez répandu est structuré autour de plusieurs couches : une couche application (1), une couche internet des objets IoT (2), une couche de connectivité réseau (3), une couche réseau (4) et la couche *blockchain* (Liu et al., 2021). Cette structure est représentée dans la Figure 3.6 :

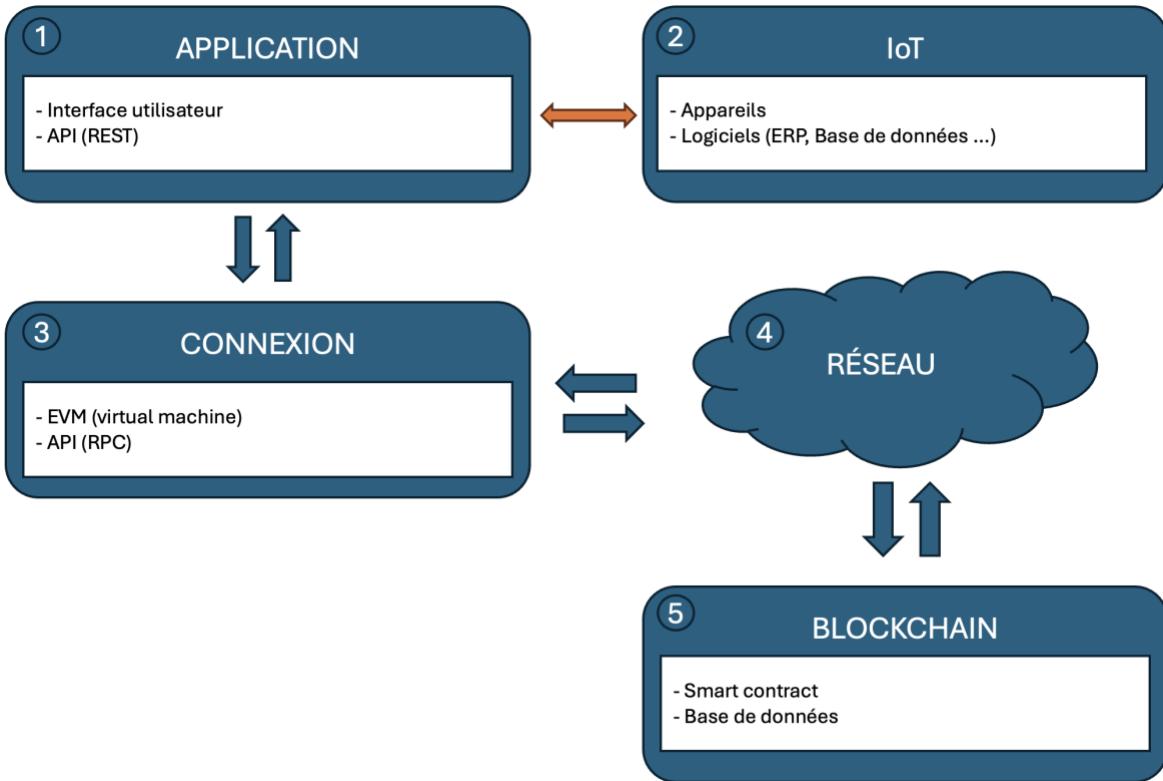


Figure 3.6 Schéma d'une architecture simple blockchain

La couche application (1) permet l'échange et la visualisation de données entre les autres logiciels et appareils ainsi que le réseau décentralisé. La couche IoT (2) favorise le traitement de la donnée pour la transformer en information pertinente. La couche connexion (3) quant à elle garantit la connexion entre le réseau *blockchain* et l'application. Au réseau (4), on retrouve les protocoles et les nœuds qui se chargent du bon fonctionnement et de la décentralisation du réseau. Enfin la couche blockchain (5) joue le rôle de stockage pour venir encrypter les données et les stocker de manière immuable.

3.3 Traçabilité Blockchain des émissions de GES

3.3.1 Stratégie de Systematic Literature Review (SLR)

La structure de l'analyse qui suit est divisée en deux parties distinctes. La première porte sur la traçabilité et la *blockchain*, tandis que la seconde traite des émissions de GES. Cette segmentation vise à citer des articles couvrant l'ensemble du projet de recherche, établissant ainsi un lien cohérent entre la *blockchain* et les émissions de GES.

En outre, cette analyse s'étend aux articles qui présentent des solutions de démonstration de faisabilité, une catégorie qui, malgré sa rareté, offre des indications précieuses. Plus précisément, ces solutions visent à aider les entreprises à améliorer la traçabilité grâce à l'utilisation de contrats intelligents et de réseaux décentralisés.

Ci-dessous est présenté, sous forme de tableau, le plan de concept ainsi que les mots clés qui ont été utilisés pour la recherche bibliographique.

Tableau 3.3 Plan de concept et mots-clés

Technologie Blockchain	Émissions de GES
Blockchain* OR Distributed Ledger Technology (DLT)* OR Decentralized systems* OR Smart contracts* OR Tokens* OR Peer-to-peer networks* OR Digital identity* OR Permissionless syst* OR Tokenization* OR Cryptoassets* OR Web3* OR Blockchain governance*	GHG emissions calculations* OR Carbon footprint assessment* OR CO2 emissions tracking* Greenhouse gases quantification* OR Carbon accounting* OR Emission tracking and reporting* OR Sustainability metrics* OR Emission monitoring* OR Carbon auditing* OR Climate impact measurement* OR Environmental performance tracking* OR Carbon management and reporting*

En examinant les articles sur la *blockchain* et les émissions de GES, on constate qu'ils sont assez nombreux. On obtient 201 résultats sur la base de données Web of Sciences (Figure 3.7) avec plusieurs articles qui traitent de plusieurs projets *blockchain* au sein des industries

agroalimentaires, sanitaire, de la construction, mais aussi au niveau des réglementations gouvernementales.

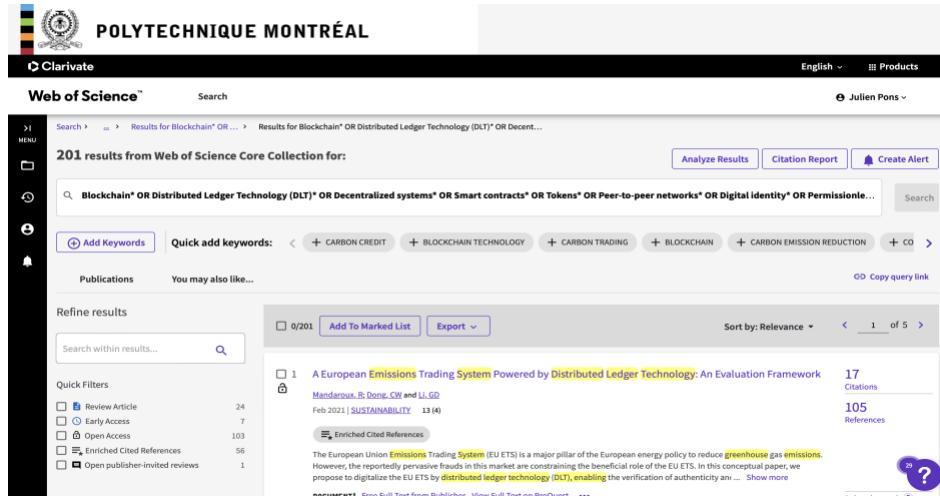


Figure 3.7 Résultats de la recherche par mots-clés

Par conséquent, il est essentiel de filtrer la recherche pour se concentrer spécifiquement sur l'industrie minière. Ce secteur est unique en raison de ses procédés de production spécifiques, qui consomment généralement plus d'énergie que ceux d'autres industries. Ces procédés, bien qu'ils puissent être comparés à ceux d'autres secteurs spécifiques comme l'alimentaire, le sanitaire, ou la construction, sont particulièrement adaptés aux réalités et aux besoins de l'industrie minière. Pour affiner la recherche, un opérateur booléen "ET" est ajouté pour cibler spécifiquement les applications de la blockchain dans ce secteur.

Cette approche méthodologique vise à permettre une exploration approfondie de la recherche existante tout en identifiant les lacunes de la littérature. L'objectif est de positionner cette étude comme une contribution significative dans le domaine émergent de la blockchain appliquée à la gestion des émissions de carbone dans le secteur minier.

Stratégie optimisée :

Tableau 3.4 Plan de concept optimisé et mots-clés

Technologie Blockchain	Émissions de GES	Industrie minière
Blockchain* OR Distributed Ledger Technology (DLT)* OR Decentralized systems* OR Smart contracts* OR Tokens* OR Peer-to-peer networks* OR Digital identity* OR Permissionless syst* OR Tokenization* OR Cryptoassets* OR Web3* OR Blockchain governance*	GHG emissions calculations* OR Carbon footprint assessment* OR CO2 emissions tracking* Greenhouse gases quantification* OR Carbon accounting* OR Emission tracking and reporting* OR Sustainability metrics* OR Emission monitoring* OR Carbon auditing* OR Climate impact measurement* OR Environmental performance tracking* OR Carbon management and reporting*	Mining industry* OR Mineral extraction* OR Mining operations* OR Ore extraction* OR Mining processes* OR Mining activities* OR Mineral exploration* OR Ore processing* OR Mining technologies* OR Mining equipment* OR Mining companies* OR Sustainable mining* OR Mining regulations* OR Mining projects

Avec ce nouvel ajout dans la recherche, on trouve que cinq résultats (Figure 3.8), dont deux qui sont pertinents. Les trois autres ont été écartés en raison de critères spécifiques, notamment leur manque d'accent sur l'intégration de la blockchain avec la gestion des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que l'absence de contribution claire à la question de la traçabilité et des performances ESG dans les chaînes d'approvisionnement. Cette focalisation affinée permet d'extraire des perspectives nuancées et des implications pratiques du paysage de la recherche, contribuant ainsi à une compréhension plus complète de l'intersection entre la blockchain et la dynamique des émissions de gaz à effet de serre. En effet, l'une des deux publications propose une intégration serrée de la blockchain avec les performances ESG pour aider les entreprises à auditer leurs chaînes d'approvisionnement.

The screenshot shows a search result for 'Blockchain* OR Distributed Ledger Technology (DLT)* OR Decent...'. The results list one item:

- Title:** Blockchain technology needs for sustainable mineral supply chains: A framework for responsible sourcing of Cobalt
- Authors:** Mutumasi, G and Abhishek, E
- Source:** 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (ISM) 2022 | Mar 2022 (Early Access) | 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY 4.0 AND SMART MANUFACTURING 200 , pp.638-647
- Citations:** 8
- References:** 41

Figure 3.8 Résultats de la recherche optimisée par mots-clés

Malgré l'engouement pour les diverses applications de la *blockchain* dans les chaînes d'approvisionnement et autres preuves de concept (POC), il existe peu d'études de cas ou de mises en œuvre dans le domaine minier pour la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre (GES) via la *blockchain*. Cependant, plusieurs entreprises en démarrage proposent des solutions visant à tracer les minéraux ainsi que leurs émissions de GES, depuis l'extraction en mine. Ce sujet sera abordé dans les sections suivantes.

3.3.2 Discussion des deux études de cas

Soit l'exemple de deux entreprises allemandes. La première, Minespider, est une plateforme *blockchain* spécialisée dans la traçabilité des chaînes d'approvisionnement de minéraux responsables et durables. Ils offrent des solutions comme des passeports de produits utilisant des codes QR pour tracer les minéraux, leur provenance et quantités, ainsi que des modules pour le suivi des émissions de carbone. Un de leurs grands projets, "OreSource", a tracé 250 tonnes d'étain de manière conforme aux réglementations européennes grâce à leur plateforme *blockchain*. Cette conformité est particulièrement importante dans le contexte des régulations croissantes, telles que la EU Battery Regulation ou encore le Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), qui imposent des normes strictes de transparence et de traçabilité. La conformité avec ces régulations a été attestée par des organismes de certification indépendants, utilisant les données transparentes

et immuables fournies par la blockchain pour vérifier le respect des normes européennes. Cela permet à Minespider de s'assurer que leurs opérations répondent aux exigences des régulations ESG tout en garantissant une chaîne d'approvisionnement responsable et durable. (Minespider, 2022). Cela démontre le potentiel d'une application décentralisée pour évaluer des indicateurs ESG, nécessitant transparence et informations décentralisées.

Circularise utilise également la *blockchain* pour offrir des passeports numériques de produits, assurant une traçabilité complète et sécurisée des chaînes d'approvisionnement industrielles. En partenariat avec Porsche, Circularise a amélioré la transparence de la chaîne de valeur, permettant à Porsche d'obtenir davantage d'informations sur les pièces et matériaux utilisés dans ses voitures. Cela a renforcé la traçabilité et la durabilité des approvisionnements, notamment en collectant les empreintes carbone des pièces pour fournir ces informations directement aux clients via une application lors de la vente d'une voiture (Circularise, 2021).

3.3.3 Automatisation des calculs d'émissions

Pour obtenir des applications *blockchain* efficaces, comme dans les cas d'étude mentionnés, il est crucial d'ajouter une part d'automatisation. Les applications décentralisées utilisent souvent des *smart contracts* pour exécuter des algorithmes et déclencher certaines requêtes automatiquement. Les *smart contracts* (ou "contrats intelligents") sont des programmes informatiques autonomes stockés sur la blockchain, qui s'exécutent automatiquement lorsque les conditions prédefinies sont remplies, sans besoin d'intervention humaine (Sadawi et al., 2021). Les calculs doivent se baser sur des données conformes aux réglementations actuelles, en intégrant des facteurs d'émissions à jour. Pour cela, on peut utiliser des bases de données gouvernementales ou des ressources d'organismes de normalisation, connectées via des API ou localement sur la plateforme (Chornovol & Norta, 2022). Une fois ces éléments en place, l'automatisation des calculs devient ergonomique et efficace.

3.3.4 Limitations

La traçabilité des émissions de GES présente certaines limitations. Par exemple, la mise à l'échelle devient un défi important, car manipuler un grand nombre de données dans une blockchain peut

poser des problèmes de performance et de stockage (Rožman et al., 2023). De plus, l'exactitude des données est un autre défi majeur, nécessitant que les données soient exactes et vérifiées, ce qui peut être difficile à garantir. Le coût et la complexité peuvent également freiner le développement de ce type d'application, notamment en ce qui concerne le déploiement et les mises à jour, car les infrastructures informatiques actuelles sont davantage orientées vers le développement web 2.0, avec des ressources limitées pour le web 3.0 (Ogawa et al., 2021). Enfin, une autre limitation réside dans les réglementations, qui varient selon les régions, rendant la standardisation compliquée.

3.3.5 Avantages de la blockchain

Basé sur différents articles, on a pu évaluer les différentes forces d'un système décentralisé *blockchain*.

- Traçabilité de bout en bout :

La blockchain permet une traçabilité complète des émissions de gaz à effet de serres de bout en bout. Chaque étape du processus de production, du transport à la consommation, peut être enregistrée sur la blockchain (Saberi et al., 2019). Par exemple, dans une chaîne d'approvisionnement minière, les émissions liées à la production de minerai, au transport des roches stériles et à la transformation peuvent toutes être suivies de manière transparente ou en protégeant les données si elles sont confidentielles. Cette traçabilité permet d'identifier les principales sources d'émissions et les mesures ciblées pour les réduire.

- Transparence et immuabilité :

L'un des principaux avantages de la blockchain pour la traçabilité des émissions de carbone réside dans sa transparence et son immuabilité. Chaque transaction ou saisie de données sur les émissions peut être vérifiée publiquement, ce qui garantit que les informations ne sont ni modifiées ni dissimulées (Dutta et al., 2020). Cette transparence est cruciale pour les entreprises et les gouvernements qui doivent déclarer leurs émissions de carbone. Les parties prenantes peuvent se fier à l'intégrité des données, ce qui est essentiel pour la crédibilité des rapports sur les émissions de GES.

- Réduction de la fraude et du double comptage :

La fraude et le double comptage sont des problèmes majeurs dans la traçabilité des émissions de GES. En effet, les émissions ne doivent pas être quantifiées deux fois, c'est-à-dire par le fournisseur et le producteur évaluant mutuellement leur empreinte carbone (Hastig & Sodhi, 2020). La blockchain atténue ces risques grâce à son mécanisme de consensus décentralisé. Chaque participant au réseau valide les transactions, ce qui rend extrêmement difficile la manipulation des données par une quelconque entité. En outre, les contrats intelligents peuvent automatiser les vérifications et les audits, garantissant que les calculs de carbone ne sont comptabilisés qu'une seule fois et que les compensations sont correctement attribuées. On peut aussi vérifier si les informations sont correctes et si la mine est reliée à des fournisseurs éthiques dans sa chaîne d'approvisionnement, respectant ainsi les normes éthiques de travail. Ces normes incluent le respect des droits humains, des conditions de travail équitables (selon les directives de l'OIT), ainsi que des standards environnementaux stricts. Des certifications comme Fairtrade ou la norme SA8000 peuvent également attester de la conformité à ces pratiques.

- Inclusion des parties prenantes :

La blockchain permet d'inclure de multiples parties prenantes dans le processus de traçabilité des émissions de GES. Les gouvernements, les entreprises, les ONG et les citoyens peuvent tous accéder aux mêmes informations, ce qui favorise la collaboration et une prise de décision plus éclairée (Paliwal et al., 2020). Toutefois, le niveau de transparence auquel les entreprises minières sont prêtes à s'engager dépend souvent de plusieurs facteurs, tels que la compétitivité du marché, la pression réglementaire et les attentes des parties prenantes. Bien que certaines entreprises soient disposées à partager des données pour améliorer leur réputation et renforcer leurs relations avec les clients et partenaires, elles peuvent également chercher à limiter l'accès à certaines informations stratégiques ou sensibles pour des raisons de confidentialité ou de sécurité. En effet, on peut intégrer différents degrés de visibilité (section 2.1.2).

3.4 Manque de la littérature et problématique

Les chapitres précédents, qui constituent un état de l'art sur la traçabilité des émissions de GES pour les entreprises minières au Québec, mettent en évidence plusieurs lacunes. En effet, on a

constaté un retard technologique notable dans les mines en général pour la quantification des émissions de GES par rapport à d'autres industries. Ce retard est accentué par le manque d'automatisation et de suivi des systèmes en place. De plus, il existe un manque de confiance et de transparence, car pour accéder à toutes les informations nécessaires, il est nécessaire de pouvoir rassembler les données des fournisseurs externes et d'autres sources, et de disposer d'un historique complet des quantifications. Actuellement, il n'existe aucun moyen efficace de réunir toutes les informations nécessaires pour évaluer avec exactitude nos émissions totales de gaz à effet de serre. En effet, la revue de littérature montre que lorsqu'on inclut des termes liés aux mines dans les recherches, aucune solution ne se démarque au Québec. Les informations sur les GES sont compilées de manière dispersée, ce qui ne suffit plus pour répondre aux demandes croissantes de transparence en matière d'émissions de GES.

Dès lors, la question de fond est de savoir **comment structurer et tracer de manière efficace la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie minière**, afin de répondre aux défis actuels en matière de transparence et de précision des émissions de GES dans ce secteur.

3.5 Les sous-objectifs

Pour répondre à la problématique précédente on vise deux sous-objectifs :

1. Définir une méthodologie structurée pour assurer la traçabilité des émissions de GES
2. Développer une solution technologique qui permet de soutenir la traçabilité des émissions de GES.

Pour atteindre ces objectifs, on propose la démarche suivante :

- Cartographier la chaîne de valeur;
- Identifier les sources d'émissions de GES de la chaîne de valeur;
- Développer les différentes stratégies de traçabilité permettant de regrouper les données d'émissions de GES;
- Identifier la plateforme technologique la plus adaptée aux besoins identifiés;
- Suivre les directives gouvernementales en matière de calculs et normes ESG.

Pour assurer la traçabilité des émissions de GES, on propose de :

- Développer une technologie capable de tracer un historique complet d'émissions de GES par *scope*;
- Assurer la transparence et fiabilité des calculs pour augmenter la sécurité;
- Représenter les résultats et les indicateurs de performances de manière claire.

Ces deux sous-objectifs sont essentiels à la réussite de la recherche puisque la méthodologie vient appuyer la logique des calculs mise en place dans la solution finale.

3.6 Présentation de la suite du mémoire

Pour la suite de ce mémoire, au chapitre 5, on discutera en détail du processus d'élaboration d'une stratégie de traçabilité des émissions de GES. On présentera une étude préliminaire permettant de clarifier les objectifs, les limites, les enjeux ainsi que les contraintes. Cela aidera à mieux orienter la stratégie et à éviter les débordements. Ensuite, on détaillera chaque étape nécessaire à l'accomplissement de la méthode de suivi de traçabilité, et on présentera les résultats obtenus. Au chapitre 6, on introduira la solution blockchain mise en place, en illustrant l'architecture et en fournissant des figures démontrant son fonctionnement, ce qui permettra de comparer cette solution avec la revue de la littérature et les autres méthodes existantes.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DU SUIVI DES ÉMISSIONS DE GES

Dans ce chapitre il sera question d'illustrer la stratégie développée pour suivre les émissions de carbone tout en respectant les directives gouvernementales (Figure 4.1). Un stage de recherche a été effectué au sein de la mine de Lithium Sayona, qui extrait et produit du lithium au Québec. Implantée dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue et en Eeyou Istchee Baie-James, Sayona occupe cinq sites.

4.1 Étude préliminaire

4.1.1 Objectif

Cette collaboration avec la mine Sayona a été réalisée dans le but d'évaluer leurs quantités d'émissions de carbone de leurs procédés pour le Complexe Lithium Amérique du Nord, basé à La Corne en Abitibi-Témiscamingue. Grâce au lancement de ses opérations, le projet est en pleine expansion, ce qui permet à Sayona d'être le principal producteur de spodumène de lithium en Amérique du Nord. Pour assurer une image de marque, Sayona désirait quantifier l'empreinte carbone de ses opérations pour être non seulement en règle avec les normes gouvernementales, mais aussi afin d'être éligible pour certaines subventions et rendre leur production la plus verte possible.



Figure 4.1 Objectifs du projet chez Sayona

La collaboration avec l'équipe environnement sur place était dans le but d'implanter un nouveau standard de suivi de GES. En effet, les méthodes n'étaient pas autonomes et reposaient sur des partenaires et des consultants externes à l'entreprise.

Le superviseur de l'équipe environnement souhaitait une transparence totale des indicateurs de performances de ses émissions sur l'année courante 2023-24. L'objectif final était d'avoir un tableau de bord conçu pour répondre à ses besoins en suivant la stratégie mise en place dont on discutera à la section 4.2.

4.1.2 Enjeux

Lors de ce stage de recherche, on a pu identifier les enjeux actuels de la mise en place d'une traçabilité d'émissions de carbone ainsi que les enjeux futurs. Les principaux enjeux sont illustrés dans la Figure 4.2.

DONNÉES DISPERSÉES

- Les données relatives aux émissions de GES sont dispersées dans différents départements de la mine, nécessitant une intégration efficace pour une vue d'ensemble

DONNÉES VARIABLES

- Les opérations minières peuvent varier, ce qui peut rendre la standardisation de la traçabilité des émissions plus complexe

CALCUL ET RAPPORTS

- Il existe des méthodologies et des ressources différentes
- Manque de bases de données automatisés (facteurs d'émissions)

DÉCLARATION DES GES

- La nécessité de garantir une intégration efficace des données de GES afin de satisfaire les exigences réglementaires et répondre aux attentes des parties prenantes

Figure 4.2 Description des principaux enjeux au sein de Sayona

Les enjeux de la Figure 4.2 s'appliquent à la mine Sayona directement, mais qu'ils englobent aussi les enjeux en général du secteur minier.

En ce qui concerne les enjeux futurs, ils sont présentés dans la Figure 4.3. Parmi ces enjeux, on retrouve d'une part les objectifs de décarbonisation, qui nécessitent une réduction continue des émissions pour répondre aux exigences réglementaires croissantes et aux attentes des parties prenantes en matière de durabilité. D'autre part, il est essentiel de stimuler l'engagement à travers toute la chaîne de valeur, en assurant une adhésion forte de la part des employés, des fournisseurs et des autres acteurs impliqués dans le processus de traçabilité des émissions. Ces deux éléments sont importants pour assurer une transition vers des pratiques plus responsables.

OBJECTIFS DE DÉCARBONISATION

- Réduire l'empreinte carbone de la flotte de camions
- Contrôler l'empreinte carbone du processus industrielle
- Diminuer les incertitudes des calculs de Scope 3

STIMULER L'ENGAGEMENT

- Favoriser l'alignement vers des initiatives ESG percutantes qui entraînent un changement positif

Figure 4.3 Les enjeux futurs pour la traçabilité GES au sein de Sayona

4.1.3 Limites

Afin de pouvoir répondre au mandat, il est important d'inclure les limites imposées par la compagnie, afin de mieux visualiser la faisabilité organisationnelle, technique, financière et temporelle. Dès lors, les limites du projet qui permettent de respecter les changements et les dispositions déjà préétablies sont énumérées ci-dessous :

- Limite 1 :

Le choix de la méthode de calcul des émissions de GES proposée par le gouvernement fédéral ne sera pas pris en compte dans la conception du modèle. On a opté uniquement pour la méthode proposée par le gouvernement provincial.

- Limite 2 :

Le projet de stage de recherche englobe un seul site de Sayona, celui de Lithium Amérique du Nord situé à La Corne, entre Val-d'Or et Amos. Ce complexe minier fait partie d'un important pôle de lithium dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue.

- Limite 3 :

Pour des raisons de simplicité, la majorité du projet porte sur les émissions des Scope 1 et 2. Les émissions de Scope 3 seront explorées, mais resteront sommaires.

- Limite 4 :

Le modèle de calculs sera principalement conçu de manière à ce qu'une personne mette à jour les données de consommation (par exemple, la consommation de diesel en litres). Le reste, comme le calcul automatique des émissions de GES en fonction des facteurs d'émissions intégrés ou la génération de rapports d'empreinte carbone basés sur les données saisies, sera automatisé.

4.1.4 Contraintes

Après avoir dressée la liste des différentes limites, il convient de présenter les contraintes auxquelles on a fait face.

- Contraintes techniques :
 - Aucune base de données ne présente les émissions de GES dans l'entreprise.
 - Les données de consommation sont distribuées dans plusieurs départements et non regroupées, ce qui rend la collecte des données plus difficile.
- Contraintes temporelles :
 - Vue la durée limitée du stage, il est difficile de déployer un nouveau logiciel robuste prêt à fonctionner.
- Contraintes humaines :
 - La manière de faire et les méthodes utilisées des employés suite à l'implantation du système vont changer, ce qui pourrait causer une résistance aux changements.
- Contraintes légales :
 - Le respect de la confidentialité des données de l'entreprise est essentiel.

4.2 Étapes du processus de traçabilité

La solution technologique innovante développée dans ce projet combine les informations nécessaires pour évaluer les émissions reliées à la production de spodumène sur le site Lithium Amérique du Nord (LAN) de Sayona et les données opérationnelles permettant la traçabilité. Cette approche génère une analyse dynamique qui offre une transparence accrue. Elle permet de visualiser et intégrer les données relatives à l'ensemble des scopes d'émissions, y compris le Scope 1 (émissions directes), le Scope 2 (émissions indirectes provenant de la consommation d'électricité), et le Scope 3 (autres émissions indirectes).

La méthodologie repose sur plusieurs grandes étapes (Figure 4.4).

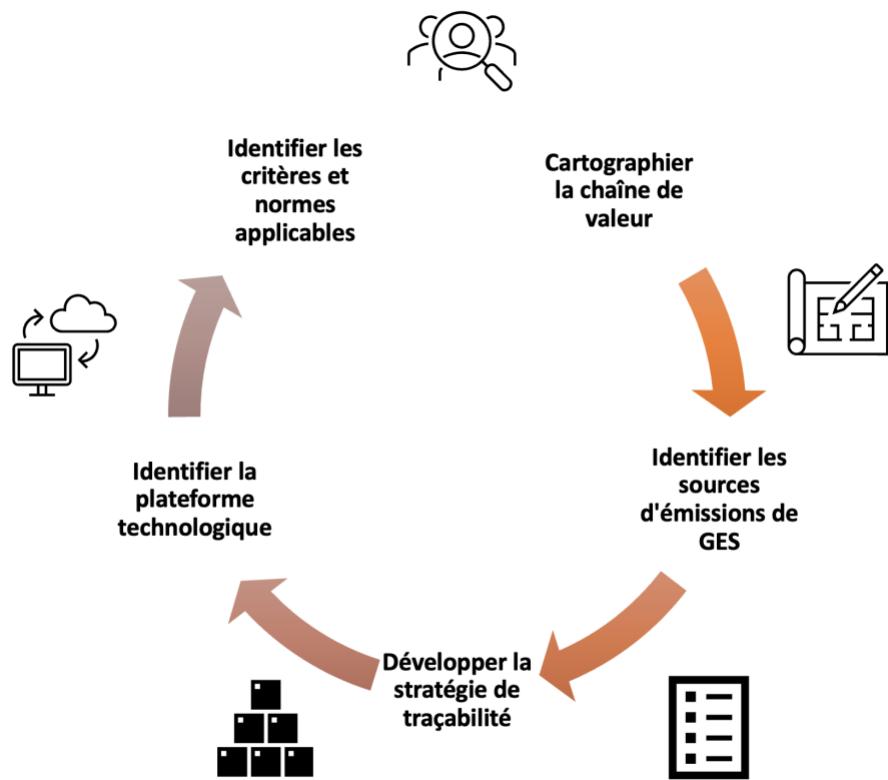


Figure 4.4 Schéma des différentes étapes de la mise en place

Dans les sous-sections suivantes, on évaluera chacune des étapes pour bien comprendre la méthodologie pour la mise en place du système de traçabilité. Cela permettra non seulement d'avoir une vision globale sur les résultats, mais aussi de prendre connaissance du cheminement parcouru pour ce projet afin de pouvoir l'appliquer à des projets futurs.

4.2.1 Cartographier la chaîne de valeur

Au sein de chaque entreprise, plusieurs processus permettent d'atteindre des objectifs précis. Cependant, avec les avancées technologiques et l'expansion de certains organismes, il est devenu de plus en plus compliqué de les comprendre. Dès lors, la cartographie de processus est un très bon outil pour synthétiser ces processus. Elle est souvent considérée comme étant une étape cruciale dans les projets d'ingénierie ou d'amélioration continue (Khudori & Kurniawan, 2018).

Toutefois, il existe actuellement un grand nombre de formalismes qui ont des caractéristiques distinctes. Parmi eux, on peut citer les plus connus : EPC (*Event-driven Process Chain*), BPMN (*Business Process Model and Notation*) ou encore UML (*Unified Modeling Language*) (Pereira & Silva, 2016). Dans le cadre de ce travail, on a sélectionné l'EPC en raison de la structure et de la portée du modèle afin qu'il soit le plus facilement interprétable.

Pour ce projet, on a évalué la chaîne de valeur en amont, depuis l'extraction du spodumène jusqu'à son expédition au port de destination final dans le pays du client (Figure 4.5). L'analyse s'est arrêtée à ce stade en raison du manque d'informations disponibles concernant les étapes ultérieures du processus de transport et de distribution.



Figure 4.5 Schéma simplifié des limites de la cartographie. Source : Auteur

Le diagramme au complet se trouve à l'**ANNEXE A**. Par conséquent, on a pu décomposer le processus de production de spodumène pour faciliter l'identification des différentes sources d'émissions ainsi que les départements concernés.

4.2.2 Identifier les sources d'émissions de GES

La collecte de données s'est déroulée durant les premières semaines du stage de recherche. On a procédé à plusieurs rencontres hebdomadaires avec les vice-présidents de plusieurs départements afin d'obtenir les informations et d'identifier les personnes à contacter. Les données étaient concentrées principalement dans trois départements :

- Département des technologies de l'information (IT) :
- Distribution de fichiers de calculs des consommations par type de produits
- Factures de consommation
- Département Finances :
- Différentes factures des comptes clients par sites
- Département Logistique :
- Fichiers de calculs pour les expéditions des marchandises
- Factures corporatives stockées sur une plateforme (Concur)

Une fois la majorité des données collectées, on s'est déplacé sur le site Lithium Amérique du Nord (LAN) à la Corne, pour compléter les informations plus spécifiques comme la consommation de certaines machineries au niveau de l'usine ou encore des rapports de maintenance et de consommations des sous-traitants sur place.

Enfin, on a compilé toutes les informations obtenues dans un fichier temporaire (section 4.3) pour pouvoir les filtrer en fonction de la stratégie décidée avec l'équipe en environnement de l'entreprise.

4.2.3 Développer la stratégie de traçabilité

À l'étape précédente, on a pu répertorier les étapes et déterminer le matériel susceptible d'émettre des GES. Il a été décidé de les identifier sous forme de postes pour favoriser la cohérence du modèle qui sera proposé. En effet, il existe plusieurs moyens de réaliser la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre (GES), allant d'un système qui calcule les émissions de GES par lot fabriqué ou par type de matériel, offrant ainsi un niveau de détail élevé. Pour ce travail, étant donné qu'il n'y avait eu aucun travail réalisé sur ce sujet précédemment, on a opté pour une stratégie en entonnoir. Cela consiste à commencer par identifier les grands types de postes d'émissions de GES, puis de

rechercher des indicateurs de plus en plus exacts, tels que les émissions par type de camions ou par type de procédés, dans le but de mieux gérer l'empreinte carbone des ressources utilisées. Un "poste" est une catégorie fonctionnelle au sein de la chaîne de valeur minière, représentant un groupe d'activités ou de processus similaires qui génèrent des émissions de GES. Chaque poste est défini par les types de flux de matière ou d'énergie qu'il implique, la nature des émissions produites (directes ou indirectes), ainsi que leur classification par scope (Scope 1, 2 ou 3). Le poste est ainsi l'unité d'analyse pour la traçabilité des émissions de GES, permettant de cibler les sources d'émissions spécifiques et de recueillir les informations nécessaires pour les quantifier.

Les principaux postes sont présentés dans le Tableau 4.1:

Tableau 4.1 Les principaux postes d'émissions de GES chez Sayona

POSTE	SOUS-POSTE	NATURE DES FLUX	CLASSIFICATION PAR SCOPE	DESCRIPTION
Combustibles	1 - Combustibles fossiles, sources fixes 2 - Combustibles fossiles, sources mobiles 3 - Production d'électricité Combustibles sources fixes 4 - Chauffage à partir des combustibles 5 - Explosifs	Émissions directes de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Scope 1	Toutes les émissions directes qui utilisent une certaine forme de consommation de combustibles tels que les carburants (diesel, essence, propane, butane, etc.) ou de matières explosives.
Électricité	1 - Fournisseur (Hydro-Québec) d'électricité 2 - Pertes en ligne de l'électricité	Émissions indirectes liées à la production d'électricité (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	Scope 2	Toutes les émissions indirectes notamment la production d'électricité provenant du fournisseur et aussi les pertes d'électricité pour son transport.
Halocarbures	1 - Climatisation et réfrigération 2 - Transport de l'électricité	-Émissions directes de HFCs -Émissions indirectes liées aux fuites de gaz réfrigérants (HFCs)	Scope 1,2	Toutes les émissions directes reliées aux fuites ou gaz rejetés dans l'atmosphère lors de maintenance d'équipement de réfrigération.

Tableau 4.1 Les principaux postes d'émissions de GES chez Sayona (suite et fin)

Eaux usées	1 - Traitement des eaux usées hors procédé	Émissions directes de CH4	Scope 1	Toutes les émissions directes reliées au méthane issu du traitement des eaux usées (matières organiques)
Intrants	1 - Métaux 2 - Produits chimiques 3 - Plastiques 4 – Hydrogène	Émissions indirectes de CO2, CH4, N2O	Scope 3	Toutes les émissions indirectes concernant la fabrication et le transport des matières premières.
Déchets	1 - Matières organiques par compostage 2 - Autres Matériaux	Émissions indirectes de CO2, CH4, N2O	Scope 3	Toutes les émissions indirectes provenant du rejet des matières organiques par compostage ou des sites d'enfouissement de matériaux.
Déboisement	1 - Perte de stocks 2 - Perte de capacité de séquestration	Émissions indirectes de CO2	Scope 3	Toutes les émissions indirectes concernant les émissions de carbone rejetées dans l'atmosphère à la suite du déboisement ainsi que la perte de séquestration que les arbres pouvaient avoir.
Expédition	1 - Flux routier sortant 2 - Flux ferroviaire sortant 3 - Flux maritime sortant	Émissions indirectes de CO2, CH4, N2O	Scope 3	Toutes les émissions indirectes reliées au transport du produit fini vers les gares et les ports.
Déplacements	1 - Déplacements domicile-travail 2 - Déplacements des employés cadre du travail	Émissions indirectes de CO2, CH4, N2O	Scope 3	Toutes les émissions indirectes au niveau des employés de l'entreprise dont les émissions pour se déplacer sur site ainsi que les voyages d'affaires.

Ces informations seront rassemblées dans une plateforme afin d'élaborer l'outil de calculs.

4.2.4 Identifier de la plateforme technologique

Pour l'identification des besoins, on a sondé avec l'équipe environnement afin de comprendre leurs exigences. Il a été conclu que la plateforme devait être la plus facile d'utilisation possible pour garantir une utilisation saine sur le long terme.

Ainsi, on a proposé une plateforme où les résultats des émissions se mettent à jour automatiquement, avec uniquement des champs de consommation à compléter (section 4.3). On a donc suggéré de réaliser un projet pilote sur Excel pour obtenir une vue d'ensemble du mécanisme et de son fonctionnement. Puis, de le retranscrire dans une application décentralisée *blockchain* afin d'avoir une solution plus robuste.

4.2.5 Identifier les critères et normes applicables

Lors de l'élaboration de la méthodologie, l'un des points les plus importants était de suivre les différentes normes à appliquer pour tracer et calculer les émissions de gaz à effets de serre. En effet, la loi exige de déclarer ces émissions au gouvernement du Québec et du Canada dès que le seuil de 10 000 tonnes de CO₂e par année est atteint. Sayona, qui a commencé ses opérations au cours de l'année 2023, sera donc concernée par les deux types de déclaration.

On a utilisé pour la province du Québec, le règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère est utilisé pour obtenir les fonctions mathématiques ainsi qu'une partie des facteurs d'émissions (RDOCECA, 2024). Pour compléter certaines données plus spécifiques à l'industrie minière comme l'utilisation d'explosif ANFO ou autre, on a eu recours au guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre (MELCCFP, 2022). Finalement, pour les informations concernant les facteurs d'émissions du scope 3, par exemple, la base de données de l'agence de la transition écologique de la République française a été employée pour estimer certaines émissions. Étant donné qu'il ne s'agit pas de données propres au Canada, un degré d'incertitude de 30% a été utilisé pour quantifier ces émissions.

Dans le cadre de ce stage, la déclaration fédérale n'est pas incluse au mandat, la majeure différence se trouvant au niveau des facteurs d'émissions. En outre, les facteurs d'émissions varient et ne sont pas les mêmes que les facteurs provinciaux, c'est pourquoi il aurait fallu prendre en compte le

programme de déclaration des gaz à effet de serre au Canada publié par le gouvernement du Canada (Environnement et Changement climatiques Canada, 2023).

Enfin, le but de cette méthodologie est de regrouper tous les outils nécessaires à la traçabilité et la déclaration des émissions de GES. Par conséquent, le lien avec la *blockchain* est tout autant intéressant. En effet, le fait d'inclure ces fonctions de calculs dans une plateforme blockchain permettrait de rendre les calculs plus ergonomiques et fiables pour les déclarations des entreprises minières. Le prochain chapitre, présente un cas d'étude blockchain pour répondre à ces besoins.

4.3 Résultats du pilote

Un fichier Excel a été utilisé pour monter la base de données complète. Dans le cadre de ce stage, c'était un moyen efficace de compiler toutes les données un peu dispersées au sein des différents départements. Ce fichier est divisé en plusieurs catégories d'onglets. On a d'abord un descriptif qui agit comme un menu récapitulatif avec des liens qui permettent de se déplacer de manière efficace entre les différents onglets du fichier. Le type d'émissions est indiqué pour se retrouver plus facilement (Figure B.1 Page d'accueil outils de calculs d'émissions de GES)

Ensuite, on a les onglets rouges (Figure B.2 Page Combustibles outils de calculs d'émissions de GES) qui correspondent aux détails des calculs d'émissions de CO₂e de chaque poste énuméré au tableau 9. Lorsqu'on sélectionne un onglet associé à un poste, on peut voir qu'il contient plusieurs sous-postes. Pour chaque sous-poste, on a la référence liée à la méthode de calculs utilisée et puis trois tableaux de calculs différents.

Tableau orange :

Combustibles fossiles, sources fixes	Combustible	Unité	Mois												Pouvoir Calorifique	Facteurs kg CO ₂ /GJ	TOTAL
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre			
Butane															28,440	60,830	0,00
Propane															25,310	59,660	0,00
Gaz naturel															38,320	49,010	0,00
Essence			100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	34,870	65,400	2 736,60
Diesel			100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	38,300	69,530	3 195,60
Mazout léger															38,780	70,050	0,00
Mazout lourd															42,500	71,070	0,00
TOTAL																	5 932,20

Figure 4.6 Exemple d'un tableau de consommations du sous-poste Combustion fossile source fixe

Dans ce tableau l'utilisateur doit venir insérer les consommations mensuelles puis les calculs de GES se font automatiquement en fonction des facteurs d'émissions. Le tableau renvoie les résultats en tonnes de CO₂ dans la colonne "TOTAL".

Tableau vert :

Combustible	Répartition par type de gaz à effet de serre		CO2 (t) combustion	CH4 (t) combustion	N2O (t) combustion	Autre Gaz combustion	CO2	PRP			total t CO2e combustion
	Facteurs CH4 g/GJ	Facteurs N2O g/GJ						1	CH4	25	
Butane	0,84	3,80	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,95	4,27	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaz naturel	0,97	0,86	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Essence	77,43	1,43	2 736,60	3,24	0,06		2 736,60	81,00	17,88	2 835,48	
Diesel	3,47	10,44	3 195,60	0,16	0,48		3 195,60	3,99	142,99	3 342,58	
Mazout léger	0,16	0,80	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
Mazout lourd	2,82	1,51	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
											6 178,05

Figure 4.7 Exemple d'un tableau de répartition par type de GES d'un sous-poste

Ce tableau montre une vue une vue de l'ensemble des GES associées à la combustion des respectifs vecteurs énergétiques. Effectivement, les combustibles une fois consommés ne rejettent pas uniquement du dioxyde de carbone (CO₂), mais également du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O). Comme les différents gaz à effet de serre ont des capacités variables à piéger la chaleur dans l'atmosphère, il est important de les quantifier dans nos calculs. Les résultats sont exprimés en CO₂e, l'unité standard utilisée pour exprimer l'impact climatique de divers gaz à effet de serre. Pour la conversion de CO₂ à CO₂e, les facteurs de potentiel réchauffement planétaires (PRP) uniques à chacun des gaz sont utilisés. Ils proviennent du Répertoire des déclarations obligatoires de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (RDOCECA), ce qui garantit que les calculs respectent les exigences réglementaires en vigueur au Québec. Ces facteurs PRP prennent en compte une période d'intégration de 100 ans.

Tableau gris :

Incertitude		t CO2e total
FAIBLE	incertitude DONNEE	
	5%	0
		0
		0
		142
		167
		0
		0
		309

Figure 4.8 Exemple d'un tableau d'incertitudes d'un sous-poste

Les incertitudes sont prises en compte dans les calculs, par trois niveaux (faibles 5%, moyens 15% et élevé 30%) (Global Climate Initiatives, 2024) selon la source des données : les données directes de consommation, les données intermédiaires ou les estimations et facteurs de conversion de coûts.

Les onglets de couleurs jaunes qui sont des récapitulatifs des émissions de GES de l'ensemble des postes. Le premier onglet “Recap CO₂e” résume bien toutes ces émissions sous forme de tableaux et d'un graphique (Figure B.3 Page Recap CO₂e outils de calculs d'émissions de GES

Quant à lui, le deuxième onglet intitulé “Bilan GES” illustre les émissions des différents postes classés en fonction des trois scopes (Figure B.4 Page Bilan outils de calculs d'émissions de GES

Les deux derniers onglets “ISO 14 069” et “GHG Protocol” peuvent être complétés dépendamment si l'on souhaite faire un audit d'un de ces deux organismes (Figure B.5 Page norme ISO outils de calculs d'émissions de GES

Ensuite, on retrouve tous les facteurs d'émissions des combustibles, de la consommation d'électricité et de tous les autres postes. Ils ont été regroupés dans différents onglets nommés FE (Figure B.8 Page Facteurs d'émissions Energie outils de calculs d'émissions de GES

Ces facteurs proviennent de plusieurs règlements obligatoires au Québec et au Canada qu'on détaillera dans la sous-section suivante.

Enfin, l'onglet bleu comporte toutes les données de consommation collectées lors du stage. À cela s'ajoutent deux onglets de Power BI qui viennent regrouper les informations pertinentes pour le tableau de bord Power BI (Figure B.9 Tableau de bord Power BI des émissions de GES de Sayona

CHAPITRE 5 SOLUTION BLOCKCHAIN DÉVELOPPEE : TRANSPARENSII

Dans ce chapitre, il sera question de présenter les différentes facettes d'un prototype *blockchain* (nommée TRANSPARENSII) pour garantir le suivi des émissions de gaz à effet de serre des entreprises minières ainsi que pour leurs déclarations. Pour respecter la confidentialité des données de Sayona, des données fictives sont utilisées.

5.1 Architecture de la plateforme

L'architecture de la plateforme reflète les principes fondamentaux de la technologie *blockchain*. Elle est divisée en quatre principales parties.

Front end : C'est la partie visible de la plateforme avec qui les utilisateurs interagissent. Il existe plusieurs façons de faire des interfaces visuelles. On a eu recours à l'infrastructure de développement React.js. Ce fichier informatique, une fois déployé, possède les protocoles API pour se connecter à la *blockchain* ainsi que d'autres interfaces utiles comme un tableau de bord Power BI par exemple.

Web3 Provider : Le *Web3 Provider* est une interface de communication essentielle entre le *Front end* et la *blockchain*. Il permet au *front end* d'envoyer des transactions et de lire des états sur la *blockchain*. La librairie utilisée pour cette interface est Web3.js. Cette bibliothèque fournit des outils pour interagir avec le contrat intelligent, écouter les événements *blockchain* et gérer les comptes utilisateurs. Le Web3 provider joue un rôle crucial en rendant les interactions *blockchain* accessibles via des applications web standards.

Blockchain : Pour ce projet, l'environnement de développement et de test Ethereum Testnet (Sepolia) est utilisé. Ce réseau permet de tester et de valider les smart *contracts* sans utiliser de véritables cryptomonnaies. La *blockchain* valide les transactions grâce à des mécanismes de consensus, garantissant la sécurité et l'intégrité des données. Elle constitue la base de la décentralisation en éliminant les points de défaillance uniques et en assurant une transparence totale des opérations.

Smart Contract : Programme auto-exécutable hébergé sur la *blockchain*. Il est écrit dans un langage de programmation spécifique à la *blockchain*, Solidity pour Ethereum. Le *smart contract* contient la logique de l'application et gère les états, les règles et les transactions de manière transparente et immuable. Une fois déployé sur la *blockchain*, il est accessible à tous les utilisateurs du réseau. Cela permet d'automatiser les processus et de garantir des transactions de calculs d'émissions de CO₂ sécurisées sans nécessiter d'intermédiaires (voir les détails à la section 5.1.2).

Un résumé de l'architecture est présenté dans le schéma de la **Error! Reference source not found.** :

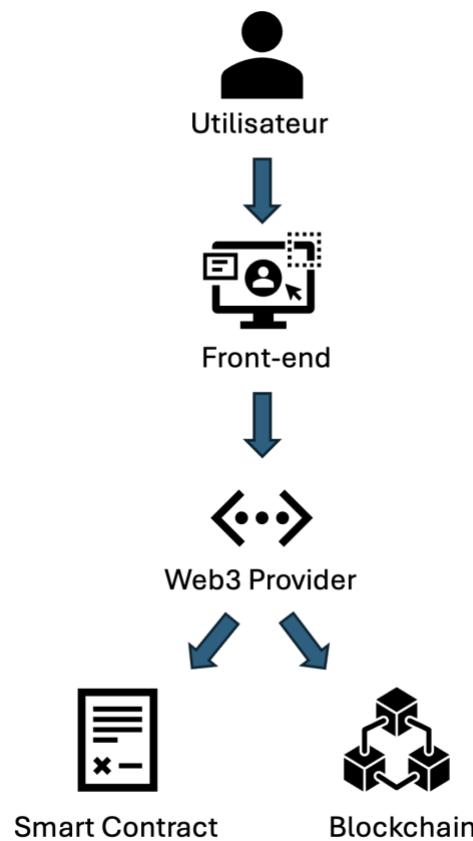


Figure 5.1 Architecture de l'application décentralisée (dApp) utilisant la Blockchain

5.1.1 Déploiement de la solution

Un moyen efficace de déployer une application décentralisée est de le faire via la Plateforme Remix (remix.ethereum.org). Remix a servi à compiler le *smart contract*, voir les erreurs de compilation

et les corriger directement dans un environnement de déploiement intégré. Une fois le contrat compilé, Remix facilite le déploiement sur divers réseaux Ethereum, y compris les réseaux de test comme Sepolia et les réseaux principaux (voir Figure 5.2).

```
// SPDX-License-Identifier: MIT
pragma solidity ^0.8.0;

contract CarbonEmissions {
    address public ownerOfContract;

    struct Company {
        string name;
        uint256 totalEmissions;
        Combustibles combustibles;
        Electricite electricite;
        Halocarbures halocarbures;
        EauxUses eauxUses;
        Intrants intrants;
        Dechets dechets;
        Debaisement debaisement;
        Expedition expedition;
        Displacements displacements;
    }

    struct Combustibles {
        uint256 fossilesSourcesFixes;
        uint256 fossilesSourcesMobiles;
        uint256 productionElectriciteCombustiblesSourcesFixes;
        uint256 chauffageFossile;
        uint256 explosifs;
    }

    struct Electricite {
        uint256 fournisseur;
        uint256 pertesEnLigne;
    }

    struct Halocarbures {
        uint256 climatisation;
    }
}
```

Déploiement sur le réseau

Smart Contract

Figure 5.2 Déploiement du smart contract en utilisant Remix

5.1.2 Spécifications de la solution

Dans ce sous-chapitre, on décrira plus en détail les caractéristiques du *smart contract* qui reprend la méthodologie des émissions de gaz à effet de serres énumérée au **Error! Reference source not found.**. Le *smart contract* développé comprend plusieurs composants et fonctions :

- Les structs :

Chaque *struct* sert à organiser et stocker des informations spécifiques sur les différentes sources d'émissions de carbone d'une entreprise (Figure 5.3). Cela permet de mieux gérer et suivre ces émissions de manière structurée et organisée.

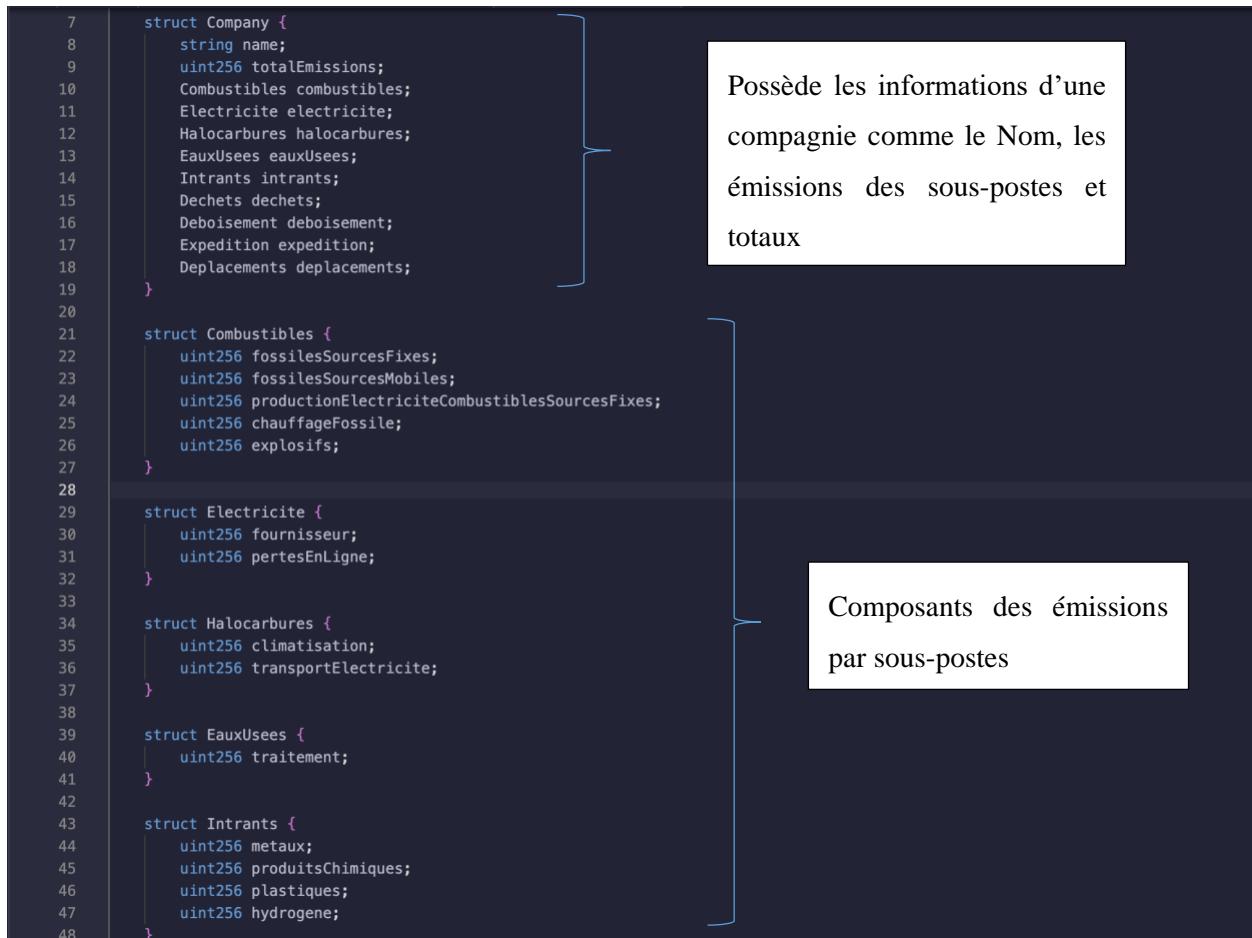


Figure 5.3 Représentation des composants struct du smart contract

- Le mapping :

Le *mapping* fonctionne comme un dictionnaire, permettant d'associer des clés à des valeurs. Dans le présent contrat, le mapping est utilisé pour associer les adresses des entreprises à de *structs Company*. C'est le mécanisme qui permet de lier la clé d'un utilisateur blockchain à sa compagnie. Ainsi, lorsqu'un utilisateur se connecte au réseau, ce mapping permet de l'associer à l'entreprise correspondante et de récupérer les données d'émissions associées.

- Les fonctions d'ajouts (*add*) :

Elles permettent de venir enregistrer les résultats en CO₂e de tous les sous-postes d'émissions. Les fonctions d'ajouts (*add*) sont des fonctions qui vont demander un coût pour la confirmation de la transaction sur le réseau (Figure 5.4). Ce sont les frais pour les mineurs qui permettent le bon fonctionnement de la chaîne (**Error! Reference source not found.**). Plus précisément ces

fonctions d'ajouts s'assurent d'enregistrer le CO₂e de chaque sous-postes. Ces émissions sont immuables une fois enregistrées.

```

97 // Combustibles
98 function addCombustiblesFossilesSourcesFixes(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
99     companies[msg.sender].combustibles.fossilesSourcesFixes += emissions;
100    updateTotalEmissions(emissions);
101 }
102
103 function addCombustiblesFossilesSourcesMobiles(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
104     companies[msg.sender].combustibles.fossilesSourcesMobiles += emissions;
105    updateTotalEmissions(emissions);
106 }
107
108 function addProductionElectriciteCombustiblesSourcesFixes(    █ infinite gas
109     uint256 emissions
110 ) public {
111     companies[msg.sender]
112         .combustibles
113         .productionElectriciteCombustiblesSourcesFixes += emissions;
114     updateTotalEmissions(emissions);
115 }
116
117 function addChaudageFossile(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
118     companies[msg.sender].combustibles.chaudageFossile += emissions;
119     updateTotalEmissions(emissions);
120 }
121
122 function addExplosifs(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
123     companies[msg.sender].combustibles.explosifs += emissions;
124     updateTotalEmissions(emissions);
125 }
126
127 // Electricité
128 function addFournisseur(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
129     companies[msg.sender].electricite.fournisseur += emissions;
130     updateTotalEmissions(emissions);
131 }
132
133 function addPertesEnLigne(uint256 emissions) public {    █ infinite gas
134     companies[msg.sender].electricite.pertesEnLigne += emissions;
135     updateTotalEmissions(emissions);
136 }
137
138 // Halocarbures

```

Figure 5.4 Différentes fonctions add du smart contract

- Fonctions de lecture (*get*) :

Une fois que la valeur de CO₂e pour un sous-poste est enregistrée, elle peut être consultée directement via des fonctions de lecture (*get*) présentées à la Figure 5.5. Étant donné que ces fonctions ne modifient pas l'état de la blockchain, contrairement aux fonctions d'ajout (*add*), elles sont gratuites et ne nécessitent aucun frais. Elles permettent uniquement de lire les données déjà stockées sur la blockchain.

```

233     // Get functions for each emission type
234     function getCombustiblesFossilesSourcesFixes(    2921 gas
235         address _company
236     ) public view returns (uint256) {
237         return companies[_company].combustibles.fossilesSourcesFixes;
238     }
239
240     function getCombustiblesFossilesSourcesMobiles(   2965 gas
241         address _company
242     ) public view returns (uint256) {
243         return companies[_company].combustibles.fossilesSourcesMobiles;
244     }
245
246     function getProductionElectriciteCombustiblesSourcesFixes(  2986 gas
247         address _company
248     ) public view returns (uint256) {
249         return
250             companies[_company]
251                 .combustibles
252                     .productionElectriciteCombustiblesSourcesFixes;
253     }
254
255     function getChaudageFossile(  2944 gas
256         address _company
257     ) public view returns (uint256) {
258         return companies[_company].combustibles.chaudageFossile;
259     }
260
261     function getExplosifs(address _company) public view returns (uint256) {  2943 gas
262         return companies[_company].combustibles.explosifs;
263     }
264
265     function getFournisseur(address _company) public view returns (uint256) {  2943 gas
266         return companies[_company].electricite.fournisseur;
267     }
268
269     function getPertesEnLigne(address _company) public view returns (uint256) {  2899 gas
270         return companies[_company].electricite.pertesEnLigne;
271     }
272
273     function getClimatisation(address _company) public view returns (uint256) {  2964 gas
274         return companies[_company].halocarbures.climatisation;

```

Figure 5.5 Fonctions get du smart contract

5.1.3 Comment ça marche

L'application développée communique directement avec le *smart contract* présenté précédemment. Pour ce faire on utilise un bouton de connexion qui va permettre à notre interface de se connecter à un réseau *blockchain* grâce au *Web3 provider* Metamask (voir Figure 5.6). Les outils comme Metamask ont pour but de simplifier la connexion au réseau *blockchain* et valider les transactions de manière sécurisée.

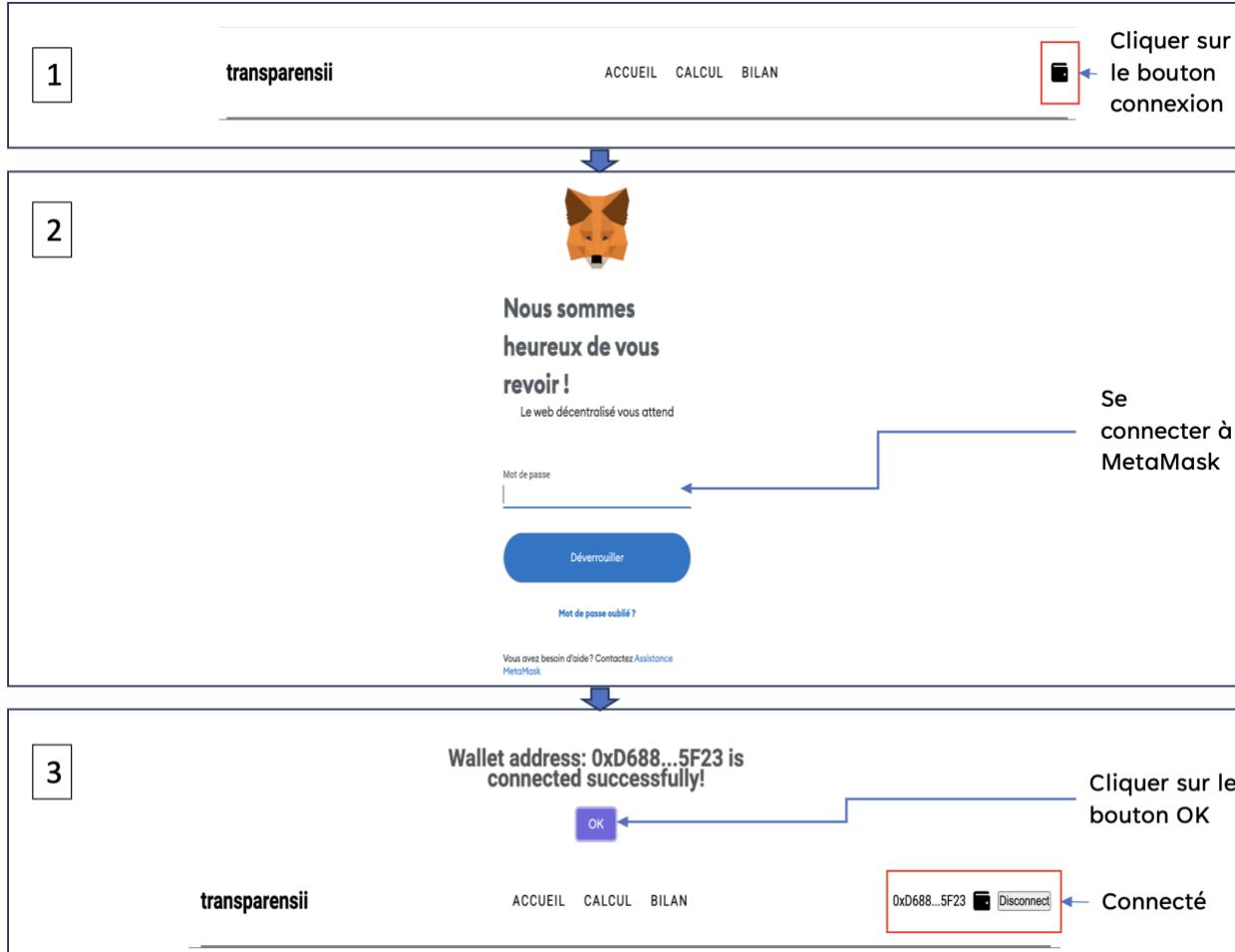


Figure 5.6 Connexion au réseau Blockchain via Metamask

Une fois connectés à Metamask, on peut interagir avec les principales fonctions du *smart contract* qui constituent le moteur de l'application sur la *blockchain*. En effet, le diagramme de cas d'utilisation de la Figure 5.7 illustre bien les échanges entre l'utilisateur et l'application. Par exemple, l'utilisateur ajoute des émissions de combustibles de sources fixes via la fonction *addCombustiblesFossilesSourcesFixes()*, puis il reçoit une validation du *smart contract*. Par la suite il pourra récupérer les informations en utilisant les fonctions *get()* vues précédemment.

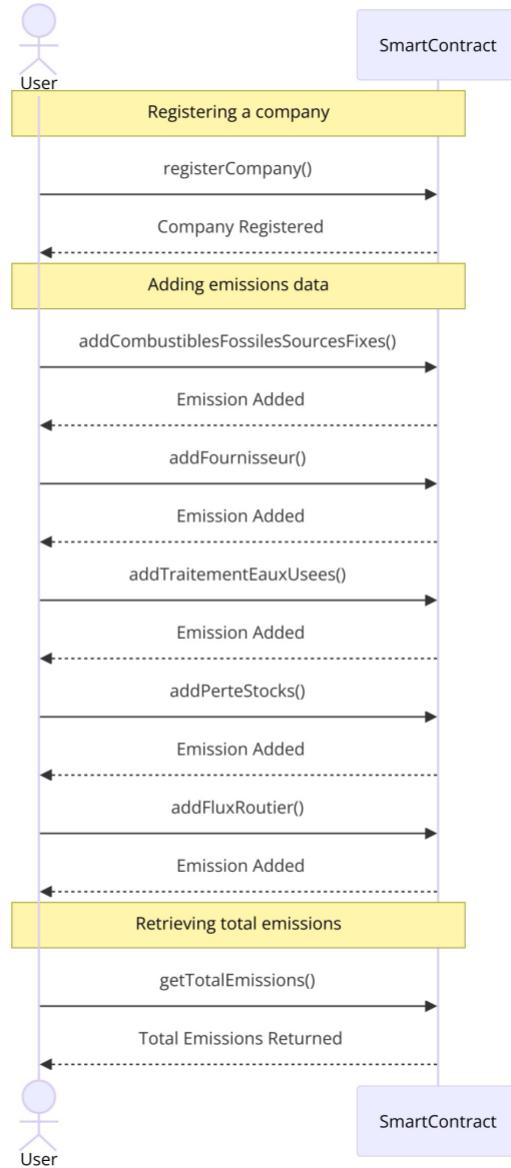


Figure 5.7 Diagramme de cas d'utilisation de l'application décentralisée (Dapp)

Toutes les fonctions présentes ci-dessus sont accessibles via des boutons de notre plateforme web. Des librairies, du code JavaScript et *Metamask*, permettent d'interagir avec celles-ci.

L'application est divisée en trois onglets principaux :

Page Accueil (Figure 5.8) :

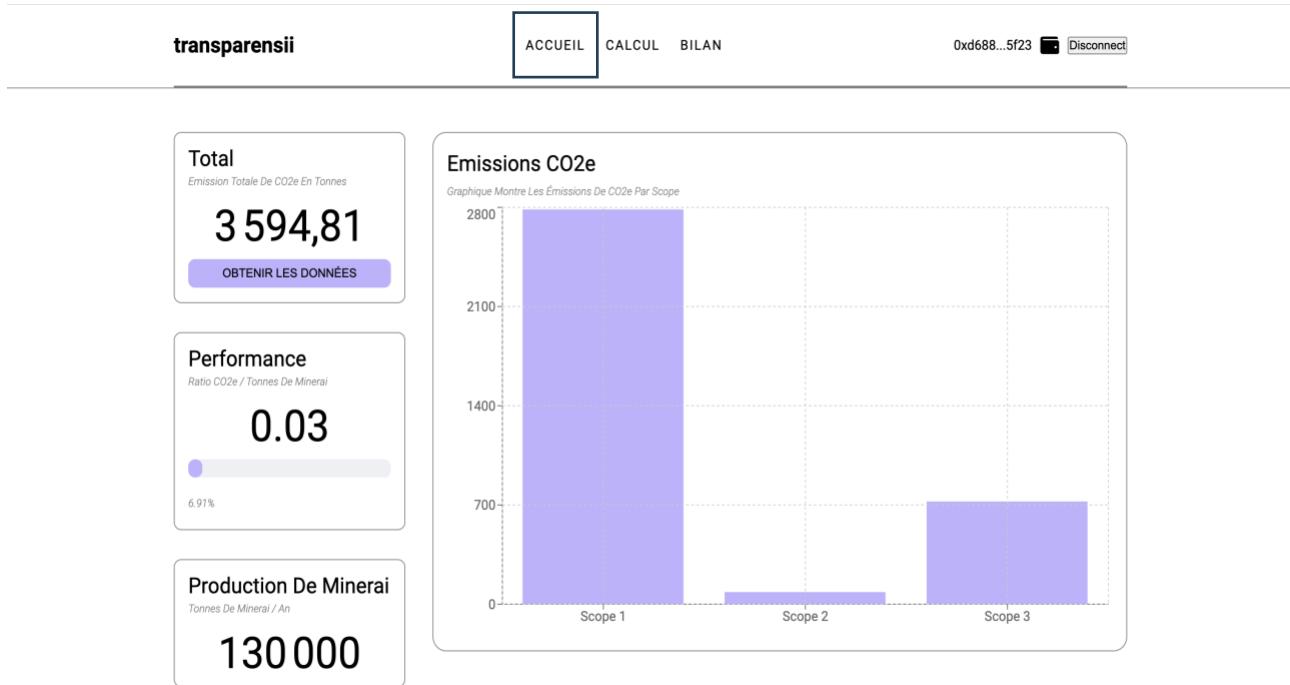


Figure 5.8 Page d'accueil interface web

Sur cette page on vient récupérer les informations qui sont stockées dans le *smart contract* sur la *blockchain* et on les affiche sous forme de tableau de bord, afin d'avoir une idée globale de ses sources d'émissions. Dans la partie de gauche de la Figure 5.8, on a des indicateurs de performances généraux. Plus précisément on a les émissions totales exprimées en CO2e, le ratio CO2e par tonne de minerai produit ainsi que la production de minerai par an. À cela s'ajoute un graphique illustrant les émissions de CO2e par *Scope*.

Page Calcul :

The screenshot shows the 'transparensii' web application interface. At the top, there are navigation links: ACCUEIL, CALCUL (which is highlighted in a blue box), and BILAN. To the right, there is a connection status: 0xD688..5F23 and a Disconnect button. Below the navigation, a horizontal menu bar includes: COMBUSTIBLES (highlighted with a red box), ELECTRICITÉ, HALOCARBURES, EAUX USÉES, INTRANTS, DÉCHETS DIRECTS, DÉBOISEMENT, EXPÉDITION, and DÉPLACEMENTS. A secondary menu bar below it shows: Onglet Combustibles (highlighted with a red box) and COMBUSTIBLES FOSSILES, SOURCES FIXES. The main content area contains a table with the following data:

Combustible	Unité	Quantité	Pouvoir Calorifique (GJ/kg)	Facteurs kg CO2/GJ	Facteurs CH4 g/GJ	Facteurs N2O g/GJ	t CO2	t CH4	t N2O	PRP (t CO2e)
Butane	litres		28.44	60.83	0.84	3.8	0	0	0	0
Propane	litres		25.31	59.66	0.95	4.27	0	0	0	0
Gaz naturel	litres		38.32	49.01	0.97	0.86	0	0	0	0
Essence	litres	300000	34.87	65.4	77.43	1.43	684.15	0.81	0.01	708.86
Diesel	litres	1000000	38.3	69.53	3.47	10.44	2663.00	0.13	0.40	2785.48
Mazout léger	litres		38.78	70.05	0.16	0.8	0	0	0	0
Mazout lourd	litres		42.5	71.07	2.82	1.51	0	0	0	0
TOTAL							3347.15	0.94	0.41	3494.34

Below the table, there is a note: "Champs à compléter" and a "Enregistrer" button. To the right, a box displays the total value: "Total en CO2e".

Figure 5.9 Page de Calcul onglet Combustibles Interface Web

C'est dans l'onglet Calcul (Figure 5.9) que l'on vient insérer toutes nos données de consommation pour venir calculer l'équivalent en tonnes de CO₂ de nos émissions par postes. On retrouve les neuf postes (Combustibles, Électricité, Halocarbures, Eaux usées...) présentés dans le **Error! Reference source not found.** du chapitre 4.2.3. Le but étant d'automatiser les calculs immédiatement sur la plateforme et venir enregistrer les résultats sur la blockchain à l'aide de bouton enregistré qui vont déclencher les fonctions de notre *smart contract*. Il est nécessaire de répéter cette manipulation pour chacun des postes en y insérant les bonnes données de consommation. Enfin, on pourra récupérer en tout temps ces informations qui sont immuables à partir des pages Accueil et Bilan.

Page Bilan :

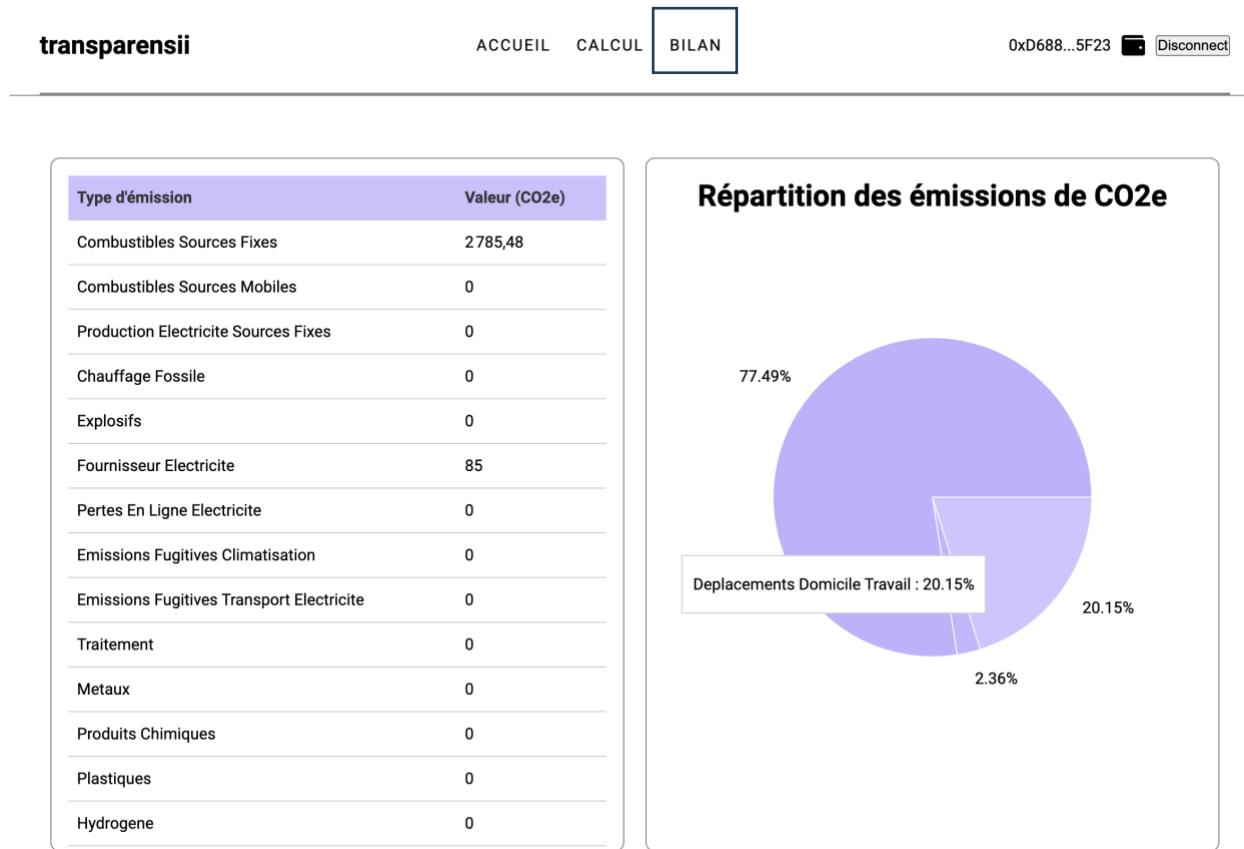


Figure 5.10 Page Bilan interface web

La Figure 5.10 présente un récapitulatif de toutes les sources d'émissions, avec les totaux en CO2e. Lorsque l'on charge cette page, les fonctions *get()* sont déclenchées pour récupérer les informations de tous les postes stockés dans le *smart contract*. De plus, sur la partie droite, un graphique affiche la part de chaque émission en pourcentages, ce qui permet de contrôler plus en détail les émissions des différents postes de son organisme.

Le code source de l'application est disponible sur la plateforme de partage Github au lien suivant :
<https://github.com/jupona/CarbonTracker>

5.1.4 Interopérabilité avec d'autres applications

L'application présentée précédemment peut être interopérable avec d'autres applications si nécessaire. En effet, grâce à des API, on peut connecter les données récupérées du *smart contract* avec des outils comme *Power BI* pour mieux représenter les indicateurs de performance de l'entreprise. De plus, on peut alimenter l'application avec d'autres logiciels ou applications. Par exemple, les données de consommation stockées dans une base de données peuvent être importées via des API dans l'application Web3, afin de calculer les émissions et de les enregistrer sur la blockchain.

5.2 Discussion et comparaison

Dans ce sous-chapitre on examinera en fonction de plusieurs critères la pertinence de la solution développée par rapport à l'état de l'existant. En effet, les solutions étudiées dans la revue de littérature ont toutes leurs avantages et inconvénients. On va présenter les améliorations qui ont été examinées dans le cadre de cette recherche.

5.2.1 Comparaison technique

Tout d'abord, on a compilé au **Error! Reference source not found.** tous les points importants de la revue littérature du **Error! Reference source not found.** afin de déterminer s'ils ont été respectés ou non.

Tableau 5.1 Comparaison avec les critères de la revue de littérature

Critères de comparaison	Solution	Revue de littérature
Types d'émissions	Émissions directes, indirectes et autres sources spécifiques au domaine minier	Émissions directes (Scope 1), indirectes (Scope 2), et autres (Scope 3)
Outils de Gestion	Application Web3 avec intégration API pour visualisation et analyse	Logiciels spécialisés (e.g., Power BI), bases de données centralisées
Réglementations	Conforme aux normes locales et législations du Québec, intégration de mises à jour pour le Canada	Suivie des normes ISO, GHG Protocol, et autres réglementations internationales
Objectif	Utilisation de la blockchain pour transparence, immutabilité et sécurité	Adoption croissante de l'IoT et du Big Data pour le suivi des émissions
Mécanisme de consensus	Proof of Stake (PoS) pour l'efficacité énergétique	Proof of Work (PoW) et Proof of Stake (PoS) selon les cas étudiés
Architecture	Décentralisée public avec nœuds vérifiant les transactions	Architectures variées : public, privé, consortium
Automatisation des calculs d'émissions	Utilisation de <i>smart contracts</i> pour automatiser et vérifier les calculs	Utilisation de logiciels automatisés intégrés avec des systèmes de blockchain
Limitations	Dépendance à la qualité des données d'entrée, complexité technique	Coûts énergétiques du PoW, problèmes d'évolution et de facilité d'utilisation

On peut voir que la solution développée répond parfaitement aux critères repérés pour les besoins de l'industrie minière actuelle. En effet, cette plateforme automatisée centralise toutes les procédures de calcul des émissions de gaz à effet de serre conformément aux réglementations

gouvernementales, et la rend accessible à tous. La véritable pertinence réside dans la traçabilité, l'immuabilité et la sécurité des informations. Cette solution, permet de fournir un historique complet des données d'émissions pour chaque entreprise utilisant notre application décentralisée.

Cela présente un grand intérêt non seulement pour les entreprises qui réalisent des audits environnementaux, mais aussi pour le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), qui peut ainsi collecter des déclarations d'émissions de manière décentralisée, tout en ayant confiance en la technologie utilisée pour garantir la confidentialité des informations. De plus, le système est suffisamment modulable et flexible pour s'adapter aux formats de données requis par le MELCCFP, assurant ainsi une intégration conforme aux standards réglementaires.

5.2.2 Fonctionnalités et capacité d'analyse

Outre la capacité technique de l'application à tracer les émissions de GES en respectant les normes appropriées, la plateforme offre des fonctionnalités particulièrement pertinentes pour les entreprises minières. En effet, l'industrie minière est l'une des plus énergivores au monde. Il est donc crucial pour ces entreprises de développer une stratégie de suivi interne efficace.

C'est pourquoi une plateforme comme celle-ci pourrait être une solution très efficace. Elle dispose de fonctions d'analyse permettant de filtrer et de calculer des ratios de manière automatisée et fiable. La vitesse des transactions, lorsque notre *smart contract* est sollicité, est relativement rapide, de l'ordre de quelques dizaines de secondes. En comparaison, les fichiers partagés sur les plateformes infonuagique peuvent rapidement devenir désorganisés, rendant le processus moins ergonomique pour les utilisateurs et les vérificateurs.

5.3 Analyse multicritère

Pour réaliser une évaluation finale, une analyse multicritère a été menée en utilisant la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). L'AHP est particulièrement adaptée aux situations où il est

nécessaire de comparer plusieurs alternatives en fonction de critères multiples. Voici quelques raisons pour lesquelles l'AHP a été choisie pour cette analyse :

- **Structuration du problème** : l'AHP permet de structurer le problème en une hiérarchie claire, facilitant l'identification et l'évaluation des critères les plus importants.
- **Pondération des critères** : cette méthode permet de déterminer les pondérations des critères de manière objective, en impliquant les experts ou les parties prenantes. Les pondérations reflètent l'importance relative de chaque critère dans le contexte spécifique de l'analyse.
- **Comparaison des alternatives** : l'AHP permet de comparer les alternatives de manière systématique et rigoureuse, en tenant compte de l'ensemble des critères. Cela permet de prendre des décisions plus éclairées.
- **Robustesse et flexibilité** : l'AHP est une méthode robuste qui peut être adaptée à une variété de contextes, et elle est flexible en permettant l'ajout ou la modification de critères en fonction des besoins spécifiques.

5.3.1 Solutions ciblées

On a évalué trois types de solutions qui sont l'application décentralisée, l'application infonuagique et l'application Excel. Elles ont été choisies car elles représentent les méthodes les plus couramment utilisées et reconnues dans le monde professionnel pour la gestion des données et des processus complexes.

- Application décentralisée : souvent basées sur la technologie blockchain, sont de plus en plus adoptées pour leur capacité à fournir un registre immuable et transparent, ce qui est important pour des processus tels que la traçabilité des chaînes d'approvisionnement et la conformité réglementaire. Selon Deloitte, les applications décentralisées gagnent en popularité dans les secteurs nécessitant une forte transparence et sécurité des données (Henry & Pawczuk, 2021)
- Application infonuagique : sont largement reconnues pour leur flexibilité, évolutivité, et facilité d'intégration avec d'autres systèmes. Les applications infonuagiquest représentent la

solution préférée pour les entreprises cherchant à réduire les coûts d'infrastructure tout en bénéficiant d'une haute performance et d'une disponibilité continue des services (Gartner, 2024). Ces solutions sont idéales pour des entreprises souhaitant automatiser des processus sans investir lourdement dans des infrastructures physiques.

- Application Excel : bien que moins sophistiquée que les deux autres solutions, l'utilisation de fichiers Excel reste extrêmement répandue dans le monde professionnel pour la gestion de données simples et l'analyse de base. Microsoft (2020) rapporte que plus de 80% des entreprises utilisent encore Excel pour des tâches quotidiennes de gestion de données en raison de son accessibilité, de sa familiarité pour les utilisateurs, et de son faible coût d'utilisation. Cependant, les limitations d'Excel en termes d'automatisation et de gestion de données complexes le rendent moins adapté aux besoins croissants des entreprises modernes.

5.3.2 Critères sélectionnés

Les critères et les pondérations sélectionnés sont :

- Traçabilité

Dans le contexte de la gestion des émissions de GES via une plateforme, la traçabilité est essentielle pour garantir que chaque transaction ou événement, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la distribution des produits finis, est enregistré de manière fiable. Chaque étape du processus doit être suivie et vérifiée pour assurer une documentation précise des émissions de GES. Cela permet non seulement de répondre aux exigences réglementaires, mais aussi de démontrer aux régulateurs, aux investisseurs, et aux clients l'engagement de l'entreprise en matière de durabilité environnementale.

- Sécurité

La sécurité est un critère essentiel lorsqu'il s'agit de gérer des données sensibles comme les émissions de GES. Les entreprises doivent garantir que les informations sur les émissions sont protégées contre les accès non autorisés et les altérations. On empêche les cyberattaques et assure que les données restent intactes et vérifiables, renforçant ainsi la fiabilité des rapports environnementaux.

- Automatisation des calculs

L'automatisation des calculs est cruciale pour la gestion des émissions de GES, car elle permet d'intégrer directement les données de consommation énergétique, les émissions calculées par processus, et d'autres indicateurs clés sans intervention manuelle. Cela réduit non seulement les erreurs humaines, mais accélère également le processus de déclaration des émissions en temps réel, garantissant une conformité continue avec les réglementations environnementales tout en permettant aux entreprises de réagir rapidement aux variations dans leurs émissions.

- Interopérabilité

Pour que la plateforme soit réellement efficace, elle doit être capable de s'intégrer avec d'autres systèmes, y compris les bases de données gouvernementales, les ERP (Enterprise Resource Planning), et les systèmes de gestion de l'énergie. Une interopérabilité solide permet de regrouper toutes les informations liées aux émissions de GES sur une seule plateforme, facilitant ainsi le partage de données avec les régulateurs et les auditeurs, en permettant à l'entreprise de tirer parti des investissements technologiques existants.

- Vitesse de transaction

Dans le contexte d'une plateforme dédiée à la traçabilité des émissions de GES, la vitesse de transaction permet d'assurer que les données soient mises à jour de manière assez rapide et fiable. Les informations doivent être disponibles en temps réel, notamment pour le suivi des émissions au niveau opérationnel ou pour répondre rapidement à des audits réglementaires imprévus.

- Facilité d'utilisation

Une plateforme complexe mais facile à utiliser encourage l'adoption par les utilisateurs finaux, notamment les responsables environnementaux et les opérateurs de terrain. Si la plateforme est intuitive, elle permet une entrée de données plus fluide, réduit les besoins de formation, et minimise les erreurs lors de la collecte des informations. Une facilité d'utilisation contribue à l'efficacité globale du système et à une meilleure qualité des données d'émissions de GES.

- Coût

Le coût de mise en œuvre et de maintenance doit être justifié par les avantages apportés, tels que la réduction des risques de non-conformité et l'amélioration de la transparence. Une solution plus

abordable, mais qui répond efficacement aux besoins en matière de traçabilité et de conformité, peut représenter un investissement stratégique, notamment si elle permet de réduire les coûts liés aux audits et aux pénalités pour non-conformité.

- Évolutivité

L'évolutivité permet d'assurer que la plateforme puisse grandir avec l'entreprise, en intégrant de nouveaux types de données, en augmentant le volume de transactions, ou en s'adaptant à de nouvelles réglementations environnementales. Une solution évolutive permet d'accompagner l'entreprise dans sa transition vers des pratiques plus durables, sans nécessiter des réinvestissements majeurs ou des interruptions opérationnelles.

- Transparence

La transparence est un avantage clé, permettant à toutes les parties prenantes (régulateurs, investisseurs, clients) d'accéder aux mêmes informations et de vérifier leur exactitude. Pour la traçabilité des émissions de GES, cela signifie que chaque tonne de CO₂e émise peut être retracée jusqu'à sa source, ce qui renforce la confiance des parties prenantes et peut améliorer la réputation de l'entreprise en tant que leader dans la transparence et la durabilité.

- Conformité réglementaire

La conformité réglementaire est un critère important, surtout dans des industries où les émissions de GES sont strictement surveillées. Une plateforme qui facilite la conformité avec les normes locales et internationales offre un avantage considérable en réduisant les risques juridiques et en protégeant l'entreprise contre les sanctions potentielles.

Cette approche collaborative assure que les pondérations reflètent non seulement les priorités stratégiques, mais aussi les réalités techniques de l'implémentation. En impliquant des experts aux compétences complémentaires, cette démarche renforce la robustesse et la fiabilité de notre analyse, garantissant que les critères choisis sont bien alignés avec les besoins spécifiques de notre projet.

5.3.3 Stratégie de pondérations

Les critères utilisés dans cette analyse ont été déterminés et pondérés avec la participation active de trois membres du comité Blockchain McGill, afin de garantir une évaluation exhaustive et impartiale. Le groupe était composé de Marc Bretones, président du comité, ainsi que des analystes Vishal Kulkarni et Mehdi Sehad.

Cette démarche collaborative a permis de combiner diverses expertises pour définir les critères pour l'analyse. Marc Bretones, en tant que président, a apporté une vision stratégique globale, tandis que Vishal Kulkarni et Mehdi Sehad, en tant qu'analystes, ont fourni des informations techniques. Les pondérations des critères ont été établies à la suite d'une discussion lors d'une compétition de *blockchain* organisée à l'Université de Waterloo, un événement où les défis spécifiques liés à la *blockchain* ont été explorés.

Lors de la conception de cette analyse multicritère, on a quantifié l'importance relative de chaque critère en attribuant des pondérations. Ces pondérations ont été établies sur une base de 1 (ou 100%) pour assurer que la somme totale de toutes les pondérations égale 1. Cela permet de normaliser l'importance relative de chaque critère, assurant que l'influence de chaque critère est correctement proportionnée lors de l'évaluation des différentes solutions.

Pour faciliter la clarté de l'analyse on a décidé d'utiliser trois pondérations majeures :

- Pondérations élevées (0.15) : Les critères qui ont reçu une pondération de 0.15, tels que la traçabilité, la sécurité, la transparence, et la conformité réglementaire, ont été considérés comme étant les plus critiques pour le succès du projet. Une pondération de 0.15 indique que ces critères sont perçus comme ayant un impact significatif sur l'évaluation globale des solutions. Par exemple, dans le contexte de la gestion des émissions de GES chez Sayona, la capacité à assurer une traçabilité rigoureuse et à se conformer aux réglementations faisait partie des principaux objectifs. Ces critères sont pondérés plus lourdement pour refléter leur importance stratégique : en effet, si l'un de ces éléments manque, il devient impossible de satisfaire les objectifs du projet.

- Pondérations modérées (0.10) : Les critères avec une pondération de 0.10, comme l'automatisation des calculs, l'interopérabilité, la facilité d'utilisation, et le coût, sont

également importants, mais leur impact est considéré comme modérément critique par rapport aux critères pondérés à 0.15. Ces critères sont essentiels pour l'efficacité et la viabilité économique de la solution, mais ils sont jugés moins déterminants que la traçabilité, la transparence, ou la conformité réglementaire. Par exemple, une solution avec une faible interopérabilité et coûteuse peut encore atteindre les objectifs définis au **Error! Reference source not found.**, bien qu'avec des compromis, mais elle reste viable.

- Pondérations plus faibles (0.05) : Les critères pondérés à 0.05, tels que la vitesse de transaction et l'évolutivité, sont importants, mais considérés comme moins prioritaires dans cette analyse spécifique. Une pondération de 0.05 signifie que bien que ces critères jouent un rôle dans l'évaluation des solutions, leur impact sur la décision finale est moindre par rapport aux autres critères. Par exemple, bien que la vitesse de transaction soit importante, elle est jugée moins critique puisque la solution développée ne requiert pas une forte utilisation du réseau, comme plus de 10 000 transactions par minute.

Liste des critères pondérés obtenues:

- Traçabilité 0.15
- Sécurité 0.15
- Automatisation des calculs 0.10
- Interopérabilité 0.10
- Vitesse de transaction 0.05
- Facilité d'utilisation 0.10
- Coût 0.10
- Évolutivité 0.05
- Transparence 0.15
- Conformité réglementaire 0.15

Ces pondérations ont été établies par consensus parmi les membres du comité en fonction de l'importance relative de chaque critère pour le succès du projet.

5.3.4 Évaluation des solutions

Application décentralisée :

Traçabilité (9) : L'application décentralisée, basée sur la blockchain, est idéale pour garantir une traçabilité complète et immuable des données. La note de 9 reflète sa capacité à suivre chaque étape du processus de manière transparente et fiable.

Sécurité (9) : Les solutions décentralisées offrent une sécurité élevée grâce à la cryptographie et à la nature distribuée de la blockchain, rendant les données extrêmement difficiles à altérer ou à pirater. C'est pourquoi cette solution reçoit une note élevée.

Automatisation des calculs (9) : L'application décentralisée permet une automatisation efficace des calculs, réduisant ainsi les erreurs humaines et accélérant les processus. La note de 9 montre son efficacité dans ce domaine.

Interopérabilité (8) : Bien que très performante, une application décentralisée peut parfois nécessiter des efforts supplémentaires pour s'intégrer avec d'autres systèmes, d'où une note légèrement inférieure.

Vitesse de transaction (6) : Les applications blockchain, bien que sécurisées, peuvent être limitées en termes de vitesse, surtout lorsque le réseau est chargé. La note de 6 reflète cette limitation.

Facilité d'utilisation (6) : Les solutions décentralisées peuvent être complexes à utiliser, surtout pour les utilisateurs non techniques, ce qui justifie une note de 6.

Coût (8) : Le coût de mise en œuvre d'une application décentralisée peut être élevé, bien que cela soit compensé par les avantages qu'elle offre. La note de 8 reflète un bon rapport coût-bénéfice.

Évolutivité (9) : Les applications décentralisées sont généralement très évolutives, ce qui leur permet de croître avec les besoins de l'entreprise, d'où une note élevée.

Transparence (9) : La blockchain est par nature transparente, permettant à toutes les parties prenantes de vérifier les données de manière indépendante, ce qui justifie la note maximale dans ce domaine.

Conformité réglementaire (8) : Bien que la blockchain permette une bonne traçabilité et sécurité, l'intégration avec des exigences réglementaires spécifiques peut nécessiter des adaptations, d'où une note légèrement inférieure à la maximale.

Application Infonuagique :

Traçabilité (6) : Les solutions infonuagiques offrent une traçabilité correcte, mais elles ne peuvent pas garantir l'immuabilité des données comme une blockchain, ce qui se reflète dans une note de 6.

Sécurité (8) : Les services infonuagiques offrent généralement une sécurité élevée, mais ils dépendent de la confiance dans le fournisseur de services, ce qui justifie une note de 8.

Automatisation des calculs (9) : L'application infonuagique permet une forte automatisation des processus, ce qui est valorisé par une note élevée.

Interopérabilité (9) : Les solutions infonuagiques sont souvent conçues pour s'intégrer facilement avec d'autres systèmes, ce qui explique la note élevée dans cette catégorie.

Vitesse de transaction (9) : Les solutions infonuagiques sont généralement rapides et réactives, offrant une excellente performance en termes de vitesse de traitement des transactions.

Facilité d'utilisation (8) : Les solutions infonuagiques sont souvent simple d'utilisation, mais peuvent nécessiter un certain niveau de formation ou d'adaptation, ce qui justifie la note de 8.

Coût (6) : Le coût des services infonuagiques peut varier, mais des frais récurrents et des coûts d'intégration peuvent être élevés, d'où la note plus basse.

Évolutivité (8) : Les solutions infonuagiques sont très évolutives, ce qui est un grand avantage, bien qu'elles puissent parfois nécessiter des mises à niveau coûteuses.

Transparence (7) : Les solutions infonuagiques offrent une certaine transparence, mais dépendent de la confiance dans le fournisseur, d'où une note de 7.

Conformité réglementaire (8) : Ces solutions peuvent être conformes aux réglementations, mais nécessitent une gestion et une supervision appropriées, justifiant une note de 8.

Fichier Excel :

Traçabilité (4) : Excel n'est pas conçu pour la traçabilité complexe, ce qui le rend moins adapté pour ce critère, d'où une note de 4.

Sécurité (6) : Bien qu'Excel offre des fonctionnalités de protection de fichier, il est vulnérable aux erreurs humaines et aux violations de sécurité, ce qui justifie une note modeste.

Automatisation des calculs (7) : Excel permet une certaine automatisation à travers les formules et les macros, mais il reste limité par rapport à des solutions plus avancées, d'où la note de 7.

Interopérabilité (5) : Excel peut échanger des données avec d'autres logiciels, mais les intégrations sont souvent basiques et nécessitent une intervention manuelle, ce qui explique la note moyenne.

Vitesse de transaction (8) : Excel est rapide pour des calculs de base, mais sa performance diminue avec l'augmentation de la complexité et du volume de données.

Facilité d'utilisation (7) : Excel est largement utilisé et familier pour de nombreux utilisateurs, mais peut devenir complexe à manipuler pour des tâches avancées.

Coût (9) : Excel est généralement peu coûteux à mettre en place et à maintenir, ce qui en fait une solution économique, justifiant la note élevée.

Évolutivité (5) : Excel a des limites importantes en termes d'évolutivité, car il n'est pas conçu pour gérer des volumes de données massifs ou des processus complexes.

Transparence (3) : Excel manque de transparence et d'immutabilité dans les enregistrements, ce qui peut entraîner des difficultés à vérifier l'exactitude des données, justifiant une note basse.

Conformité réglementaire (6) : Excel peut être utilisé pour se conformer aux réglementations, mais il nécessite un suivi rigoureux et manuel, ce qui réduit son efficacité dans ce domaine. Le Tableau 5.2 présente la pondération et les scores obtenus par chaque solution pour chaque critère.

Tableau 5.2 Tableau de pondération et score des différents critères

Critère	Poids	Application décentralisée	Score Décentralisée	Application Infonuagique	Score Infonuagique	Fichier Excel	Score Excel
Traçabilité	0.15	9	1.35	6	0.90	4	0.60
Sécurité	0.15	9	1.35	8	1.20	6	0.90
Automatisation des calculs	0.10	9	0.90	9	0.90	7	0.70
Interopérabilité	0.10	8	0.80	9	0.90	5	0.50
Vitesse de transaction	0.05	6	0.30	9	0.45	8	0.40
Facilité d'utilisation	0.10	6	0.60	8	0.80	7	0.70
Coût	0.10	8	0.80	6	0.60	9	0.90
Évolutivité	0.05	9	0.45	8	0.40	5	0.25
Transparence	0.15	9	1.35	7	1.05	3	0.45
Conformité réglementaire	0.15	8	1.20	8	1.20	6	0.90

Par exemple, pour l'application décentralisée, le score pour la traçabilité est calculé ainsi : 9 (note) x 0.15 (poids) = 1.35. Le score total est la somme de tous ces scores pondérés.

Total du score pondéré :

Application décentralisée = $1.35 + 1.35 + 0.90 + 0.80 + 0.30 + 0.60 + 0.80 + 0.45 + 1.35 + 1.20 = 9.10$

Application *Infonuagique* = $0.90 + 1.20 + 0.90 + 0.90 + 0.45 + 0.80 + 0.60 + 0.40 + 1.05 + 1.20 = 8.40$

Fichier Excel = $0.60 + 0.90 + 0.70 + 0.50 + 0.40 + 0.70 + 0.90 + 0.25 + 0.45 + 0.90 = \mathbf{6.30}$

Les résultats indiquent que l'application décentralisée obtient le score le plus élevé (9.1), suivie par l'application infonuagique (8.4). Le fichier Excel, avec un score de 6.30, est moins performant en comparaison.

L'analyse montre que, malgré la grande performance de l'application infonuagique, l'application décentralisée offre des avantages significatifs, notamment en termes de traçabilité (1.35), de sécurité (1.35) et de transparence (1.35). Un registre immuable et transparent peut renforcer la robustesse de nombreux processus, en particulier pour la traçabilité des chaînes d'approvisionnement et les passeports numériques.

En comparaison, la solution infonuagique se distingue par sa facilité d'utilisation (0.80), son interopérabilité (0.90) et sa haute performance (0.90), mais elle est surpassée par l'application décentralisée dans les critères clés mentionnés précédemment.

Quant au fichier Excel, bien qu'abordable et largement utilisé, il présente des limitations importantes par rapport aux autres solutions, notamment pour la vitesse de transaction et d'automatisation des calculs. Ces limitations rendent Excel moins compétitif face aux applications décentralisée et infonuagique pour les besoins complexes et exigeants des processus modernes.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour conclure, dans le cadre de cette recherche, on a pu évaluer plusieurs critères (section 5.3.2) de la technologie *blockchain* pour la traçabilité des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie minière. Il est clair que cette technologie suscite un intérêt croissant dans les recherches actuelles et peut désormais être qualifiée de courante et acceptée dans notre société. De nombreux secteurs et entreprises bénéficient déjà grandement de la *blockchain*, notamment pour le suivi des biens dans les chaînes d'approvisionnement, le *digital designing*, ou encore pour les procédés de finance décentralisée.

En examinant le secteur minier, on constate qu'au Québec, il existe peu de solutions technologiques permettant un suivi précis des sources d'émissions. C'est pourquoi la solution proposée répond aux exigences croissantes des réglementations environnementales mises en place par le gouvernement. L'activité minière représente un pôle de développement important dans la région du Québec, il est donc primordial de fournir les meilleurs outils aux entreprises pour favoriser leur croissance tout en respectant les indicateurs ESG. L'objectif principal de cette recherche était de développer une solution efficace pour tracer les émissions de GES dans l'industrie minière en utilisant la technologie blockchain. Pour ce faire, deux sous-objectifs ont été définis : d'une part, élaborer une méthodologie structurée pour assurer la traçabilité des émissions de GES, et d'autre part, développer un prototype fonctionnel basé sur la blockchain. La recherche a abouti à une contribution théorique en proposant un cadre méthodologique robuste pour la traçabilité des GES, ainsi qu'une contribution pratique par le développement et la validation d'un prototype de blockchain appliqué à ce contexte. Les résultats montrent que la solution proposée est efficace pour améliorer la transparence, la sécurité et l'automatisation des processus de suivi des émissions de GES. Cependant, il est important de souligner que l'exactitude des données reste un enjeu majeur, étant donné que la blockchain s'appuie sur des informations provenant d'autres technologies et bases de données. Il est donc essentiel que les données utilisées soient précises et fiables pour garantir la conformité aux normes réglementaires et les exigences d'audit. De plus, l'adaptabilité de la solution aux besoins spécifiques de chaque entreprise minière est déterminante pour maximiser son efficacité, notamment en ce qui concerne la conformité réglementaire et l'audit des émissions.

D'un point de vue critique, ce type de solution pourrait révolutionner la manière dont les audits environnementaux sont réalisés. En éliminant les coûts élevés des consultations de spécialistes en environnement, la présente recherche vise à établir ce nouveau standard pour des calculs d'émissions de GES fiables et précis, avec un niveau élevé d'automatisation. Les entreprises pourraient obtenir des certifications numériques par le biais d'une application blockchain décentralisée. La transparence offerte permettrait aux vérificateurs de juger de la robustesse des déclarations et des calculs. À une échelle plus large, cette technologie pourrait devenir le nouveau standard de déclaration des émissions de gaz à effet de serre auprès du gouvernement canadien. L'historique immuable des déclarations serait enregistré dans des *smart contracts* pour chaque entreprise. Mais encore, cet outil peut être extrêmement pratique pour les entreprises à l'interne, leur permettant de suivre en temps réel leurs émissions de GES via leur profil sur l'application *blockchain*.

En ce qui concerne les perspectives futures, il serait pertinent de mettre à jour l'application en fonction des avancées réalisées dans la quantification des émissions de GES, notamment pour le scope 3, qui est le plus difficile à évaluer. Il est également essentiel de constamment actualiser les facteurs d'émission pour les différents postes en fonction des régions. En outre, il serait recommandé d'ajouter la possibilité de créer des profils d'entreprises et de partager certaines informations avec d'autres utilisateurs du réseau, tout en respectant les degrés de visibilité.

RÉFÉRENCES

- Azarkamand, S., Ferré, G., & Darbra, R. M. (2020). Calculating the Carbon Footprint in ports by using a standardized tool. *Science of The Total Environment*, 734, 139407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139407>
- Bray, S. (2020). *Implementing cryptography using Python*. Wiley.
- Cao, R., Mo, Y., & Ma, J. (2023). Carbon Footprint Analysis of Tourism Life Cycle : The Case of Guilin from 2011 to 2022. *Sustainability*, 15(9), 7124. <https://doi.org/10.3390/su15097124>
- Cho, C. H., Bohr, K., Choi, T. J., Partridge, K., Shah, J. M., & Swierscz, A. (2020). Advancing Sustainability Reporting in Canada : 2019 Report on Progress. *Accounting Perspectives*, 19(3), 181-204. <https://doi.org/10.1111/1911-3838.12232>
- Chornovol, O., & Norta, A. (2022). Sustainable Machine-to-Everything Infrastructure Management : Blockchain-Based Impact Indexing for Distributed Collaboration Systems. *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789760>
- Circularise. (2021). *Achieving visibility into the Porsche supply chain*. https://www.circularise.com/resource/achieving-visibility-into-the-porsche-supply-chain?_gl=1*1uo8bjw*_up*MQ..*_ga*MTcyMzEzMjkyOS4xNzE4NjkyNzY0*_ga_PG_BVW6ZBJR*MTcxODY5Mjc2NC4xLjEuMTcxODY5MzM0NC4wLjAuMTA0ODQ5NTU2Ng..
- Debrauwer, L., & Van der Heyde, F. (2020). *UML 2.5 : Initiation, exemples et exercices corrigés* (5e éd). Éditions ENI.
- Dutta, P., Choi, T.-M., Soman, S., & Butala, R. (2020). Blockchain technology in supply chain operations : Applications, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102067>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2023). *EXIGENCES RELATIVES À LA QUANTIFICATION DES GAZ À EFFET DE SERRE DU CANADA (PROGRAMME DE DÉCLARATION DES GAZ À EFFET DE SERRE DU CANADA)*, p. 153. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/En81-28-2023-eng.pdf
- Fang, H., Jiang, D., Yang, T., Fang, L., Yang, J., Li, W., & Zhao, J. (2018). Network evolution model for supply chain with manufactures as the core. *PLOS ONE*, 13(1), e0191180. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191180>
- Gartner. (2024). *Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending to Surpass \$675 Billion in 2024*. Gartner, Inc. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-05-20-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-surpass-675-billion-in-2024>
- GCHQ. (2024). *CyberChef*. <https://gchq.github.io/CyberChef/>
- Gellhorn, E., Kovacic, W. E., & Calkins, S. (2004). *Antitrust law and economics in a nutshell* (5. ed). Thomson/West.

- Ghiro, L., Restuccia, F., D’Oro, S., Basagni, S., Melodia, T., Maccari, L., & Cigno, R. L. (2021). A Blockchain Definition to Clarify its Role for the Internet of Things. *2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/MedComNet52149.2021.9501280>
- Global Climate Initiatives. (2024). *Evaluer la qualité de son Bilan Carbone®*. Global Climate Initiatives Inc. <https://globalclimateinitiatives.com/evaluer-la-qualite-de-son-bilan-carbone/#:~:text=L'incertitude%20d'un%20bilan,un%20niveau%20de%20confiance%20don%C3%A9>
- Gouvernement du Canada. (2023, juin 29). *Émissions de gaz à effet de serre*. Canada.ca. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html>
- Gouvernement du Canada. (2024a, février 2). *La carboneutralité d'ici 2050*. Canada.ca. <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/carboneutralite-2050.html>
- Gouvernement du Canada. (2024b, mars 7). *Déclaration des émissions de gaz à effet de serre*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/declaration-installations/declaration.html>
- Gouvernement du Québec. (2024a). *Déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l’atmosphère*. Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/declar_contaminants/index.htm
- Gouvernement du Québec. (2024b). Définition interopérabilité. In *Office québécois de la langue française*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8395687/interoperabilite>
- 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, W., & Pawczuk, L. (2021). *Blockchain : Ready for business*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2022/blockchain-trends.html>
- Hertwich, E. G., & Wood, R. (2018). The growing importance of scope 3 greenhouse gas emissions from industry. *Environmental Research Letters*, 13(10), 104013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae19a>
- Hu, Y., & Man, Y. (2023). Energy consumption and carbon emissions forecasting for industrial processes : Status, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113405. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113405>
- IBM. (2024). *Qu'est-ce que l'automatisation ?* [Site Web]. <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/automation>
- Institut national de la recherche scientifique (INRS), Dandois-Fafard, M, Nguenevit, K, Pasquier, L-C, & Bée, S. (2020). *Bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) de l’INRS* (p. 21). <https://inrs.ca/wp-content/uploads/Bilan-GES-Carbone-INRS-2020-2021.pdf>

- Institut national des mines. (2023). *Les tendances générales en formation minière* (Rapport semestriel réalisé à partir de l'infolettre MineAvenir du 1er septembre 2022 au 26 janvier 2023, p. 45) [Études et rapports]. Gouvernement du Québec.
- Jiang, Y., Yu, H., Ampaw, E. M., Wang, C., & Jiang, P. (2024). Innovating for a greener world : Simulating low-carbon innovation in manufacturing companies from the lens of community succession. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140053. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140053>
- Khudori, A. N., & Kurniawan, T. A. (2018). Business Process Model Transformation Techniques : A Comprehensive Survey. *Advanced Science Letters*, 24(11), 8606-8612. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.12311>
- Kok, A. S. (2019). *Hands-On Blockchain for Python Developers : Gain Blockchain Programming Skills to Build Decentralized Applications Using Python*. Packt Publishing Ltd.
- La réduction des émissions par la réglementation des gaz à effet de serre - Environnement et changement climatique Canada : Rapport de l'auditeur indépendant*. (2023). Bureau du vérificateur général du Canada = Office of the Auditor General of Canada.
- Lei, L., Song, L., & Wan, J. (2022). Improved Method of Blockchain Cross-Chain Consensus Algorithm Based on Weighted PBFT. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/5169259>
- Liu, T., Yuan, Y., & Yu, Z. (2021). The service architecture of Internet of things terminal connection based on blockchain technology. *The Journal of Supercomputing*, 77(11), 12690-12710. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03774-9>
- Lupăiescu, S., Cioata, P., Turcu, C. E., Gherman, O., Turcu, C. O., & Paslaru, G. (2022). Centralized vs. Decentralized : Performance Comparison between BigchainDB and Amazon QLDB. *Applied Sciences*, 13(1), 499. <https://doi.org/10.3390/app13010499>
- MELCCFP. (2022). *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* (p. 114). MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DE LA FAUNE ET DES PARCS. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>
- Mell, P. M., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing* (NIST SP 800-145; 0 éd., p. NIST SP 800-145). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
- Mendi, A. F., Demir, Ö., Sakaklı, K. K., & Çabuk, A. (2020). A New Approach to Land Registry System in Turkey : Blockchain-Based System Proposal. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 86(11), 701-709. <https://doi.org/10.14358/PERS.86.11.701>
- Minespider. (2022). *How a leading tin producer leverages blockchain tech to track responsibly sourced tin*. https://cdn.prod.website-files.com/62fc1b4ed3d11fcdb917ace9/6318b2737c5b4851b47157f1_luna__minespider_case_study__2.pdf
- Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and cryptocurrency technologies : A comprehensive introduction*. Princeton university press.

- Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, H. T., & Dutkiewicz, E. (2019). Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks : Fundamentals, Applications and Opportunities. *IEEE Access*, 7, 85727-85745. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925010>
- Ogawa, D., Kobayashi, K., & Yamashita, Y. (2021). Effectiveness and Limitation of Blockchain in Distributed Optimization : Applications to Energy Management Systems. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E104.A(2), 423-429. <https://doi.org/10.1587/transfun.2020MAI0001>
- 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>
- Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint : Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), 135-160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Patel, N., Feofilovs, M., & Romagnoli, F. (2023). Carbon Footprint Evaluation Tool for Packaging Marketplace. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 368-378. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0027>
- Pellerin, R. (2023). *Introduction au progiciel de gestion intégrée (ERP)*. Polytechnique Montréal.
- Pereira, J. L., & Silva, D. (2016). Business Process Modeling Languages : A Comparative Framework. In Á. Rocha, A. M. Correia, H. Adeli, L. P. Reis, & M. Mendonça Teixeira (Éds.), *New Advances in Information Systems and Technologies* (Vol. 444, p. 619-628). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31232-3_58
- Process Street. (2024). *The Ultimate Guide to Business Process Automation*. <https://www.process.st/business-process-automation-guide/>
- Propulsion Québec. (2022). *Projet pilote sur l'adoption de mécanismes de traçabilité des minéraux pour batteries* [Rapport de projet]. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/ressources-naturelles/Documents/RA_Tracabilite_PropulsionQc_MERN.pdf
- Puthal, D., Malik, N., Mohanty, S. P., Kougianos, E., & Yang, C. (2018). The Blockchain as a Decentralized Security Framework [Future Directions]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(2), 18-21. <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2776459>
- Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère (2024). <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/rc/Q-2,%20R.%202015.pdf>
- Rožman, N., Corn, M., Škulj, G., Berlec, T., Diaci, J., & Podržaj, P. (2023). Exploring the Effects of Blockchain Scalability Limitations on Performance and User Behavior in Blockchain-Based Shared Manufacturing Systems : An Experimental Approach. *Applied Sciences*, 13(7), 4251. <https://doi.org/10.3390/app13074251>
- Rudolph, S. (2022). *Annual and Sustainability Report 2022 Porsche AG* [Sustainability report]. Porsche. <https://newsroom.porsche.com/en/company/annual-sustainability-report-2021/download-center.html>

- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). 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>
- Sadawi, A. A., Madani, B., Saboor, S., Ndiaye, M., & Abu-Lebdeh, G. (2021). A comprehensive hierarchical blockchain system for carbon emission trading utilizing blockchain of things and smart contract. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121124. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121124>
- Stallings, W. (2019). *Effective cybersecurity : Understanding and using standards and best practices*. Addison-Wesley.
- Statista. (2023). *Blockchain technology market size worldwide in 2017 and 2018, with forecasts from 2019 to 2027* [Jeu de données]. <https://www.statista.com/statistics/1015362/worldwide-blockchain-technology-market-size/>
- Statistics Canada. (2020). *Information and communication technologies used by industry and size of enterprises* [Jeu de données]. Government of Canada. <https://doi.org/10.25318/2210011701-ENG>
- Statistique Canada. (2020). *Technologies de l'information et des communications utilisées par industrie et taille d'entreprise* [Jeu de données]. Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.25318/2210011701-FRA>
- Suárez, C. E. & Minerals, Metals and Materials Society (Éds.). (2012). *Light Metals 2012 : Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2012 [141st] Annual Meeting & Exhibition, Orlando, Florida, USA, March 11-15, 2012*. TMS.
- Transforma Insights. (2021). *Distributed ledger market size worldwide from 2020 to 2030, by use case* [Jeu de données]. <https://www.statista.com/statistics/1259858/distributed-ledger-market-size-use-case-worldwide/#statisticContainer>
- Vaillancourt, J., Gauthier, K., & Deneault, K. (2019). *Portrait numérique de l'industrie minière au Québec*. L'Institut national des mines du Québec (INMQ) ; Le Comité sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie des mines (CSMO Mines) ; L'Association minière du Québec (AMQ).
- Wen, X.-J., Chen, Y.-Z., Fan, X.-C., Zhang, W., Yi, Z.-Z., & Fang, J.-B. (2022). Blockchain consensus mechanism based on quantum zero-knowledge proof. *Optics & Laser Technology*, 147, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107693>
- Xie, M., Liu, J., Chen, S., & Lin, M. (2023). A survey on blockchain consensus mechanism : Research overview, current advances and future directions. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 16(2), 314-340. <https://doi.org/10.1108/IJICC-05-2022-0126>
- Yan, J., Lu, Q., Chen, L., Broyd, T., & Pitt, M. (2022). SeeCarbon : A review of digital approaches for revealing and reducing infrastructure, building and City's carbon footprint. *IFAC-PapersOnLine*, 55(19), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.211>

Yañez, P., Sinha, A., & Vásquez, M. (2019). Carbon Footprint Estimation in a University Campus : Evaluation and Insights. *Sustainability*, 12(1), 181. <https://doi.org/10.3390/su12010181>

ANNEXE A DIAGRAMME EPC DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT

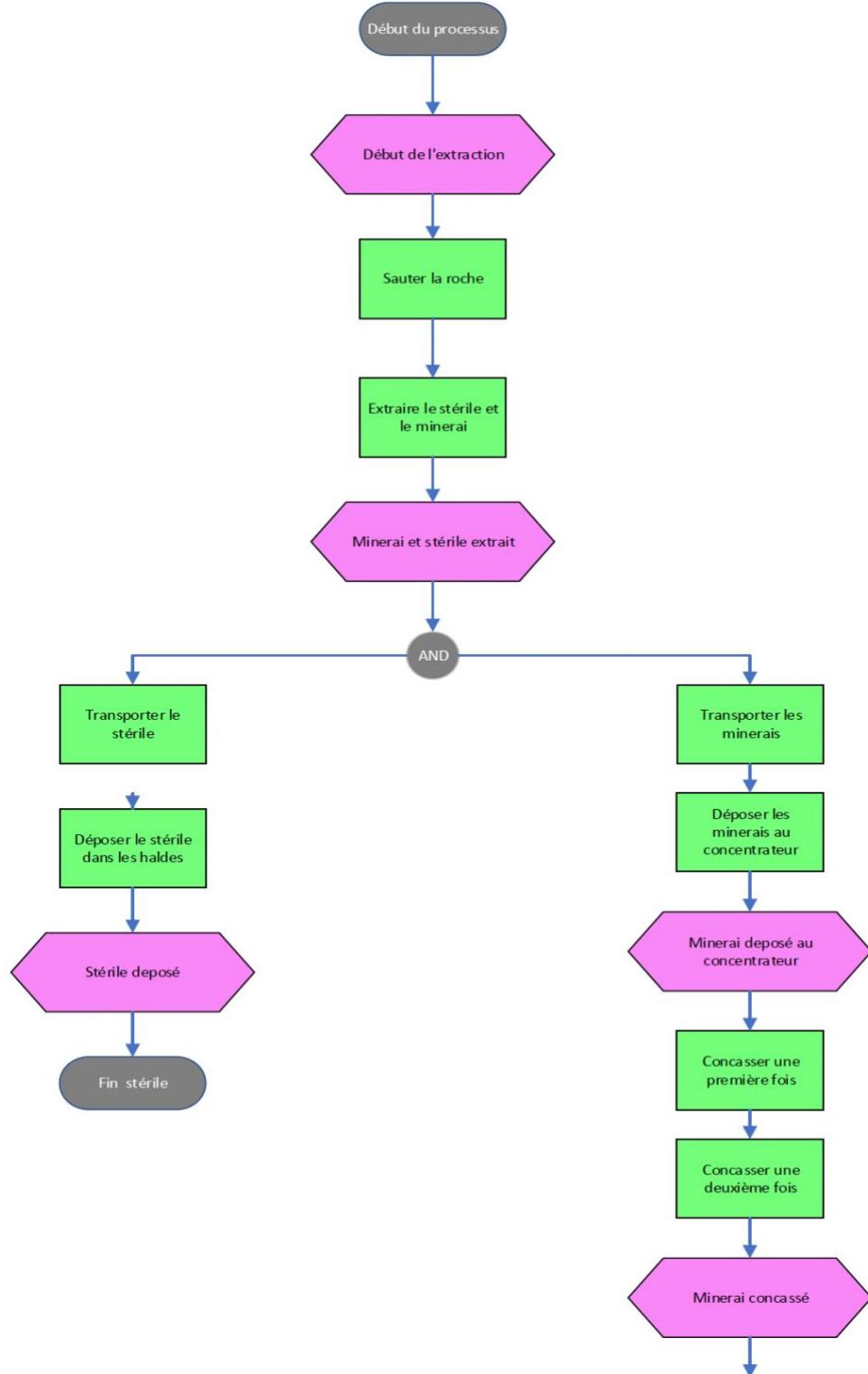


Figure A.1 Diagramme EPC représentant la chaîne d'approvisionnement du spodumène

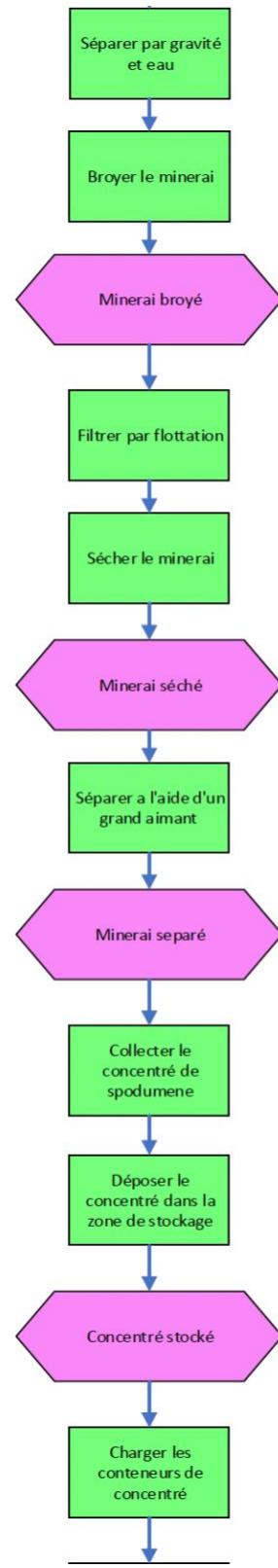


Figure A.1 Diagramme EPC représentant la chaîne d'approvisionnement du spodumène (suite)



Figure A.1 Diagramme EPC représentant la chaîne d'approvisionnement du spodumène (suite et fin)

ANNEXE B RÉSULTATS DU PILOTE

Les données ont été modifiées par soucis de confidentialité.

Fiche descriptive du site LAN			
Année du Bilan Carbone®	2023		
Nom de l'organisation	Sayona		
Nom du site	LAN (North America Lithium)		
Nature de l'activité	Exploitation Minière		
Intitulé des postes (modifiable)	Y aller !	Noms des onglets (ne pas modifier)	Emissions relatives (à personnaliser)
Combustibles Electricité Emissions fugitives d'halocarbures Traitement des eaux usées Achats de matières premières Expédition Déplacements Déboisement Déchets directs	Combustibles Electricité Emissions fugitives d'halocarbures Traitement des eaux usées Achats de matières premières Expédition Déplacements Déboisement Déchets directs	Combustibles Electricité Halocarbures Eaux usées Intrants Expédition Déplacements Déboisement Déchets directs	Gaz consommées par période (Annuel / mensuel) Électricité consommées par période (Annuel / mensuel) Fuite de gaz / entretiens / climatisation / ventilation Traitement des eaux hors procédés industriels Produits chimiques, matériaux (plastique, métaux...) aval (vente / export) Professionnels et domicile-travail Déforestation/ Déchets produits
Recap CO2e Bilan GES GHG Protocol ISO	Recap CO2e Bilan GES GHG Protocol ISO 14069	Recap CO2e Bilan GES GHG Protocol ISO 14069	Résultats en équivalent CO2 Extraction des résultats pour le reporting Bilan GES Extraction des résultats pour le reporting GHG Protocol Extraction des résultats pour le reporting ISO/TR 14069:2013
Graphiques	Graphiques	Graphiques	Graphiques des résultats en CO2e

▶ Descriptif | Combustibles | Electricité | Halocarbures | Eaux usées | Intrants | Déchets directs | Déboisement | Expédition | Déplacements | Recap CO2e |

Figure B.1 Page d'accueil outils de calculs d'émissions de GES

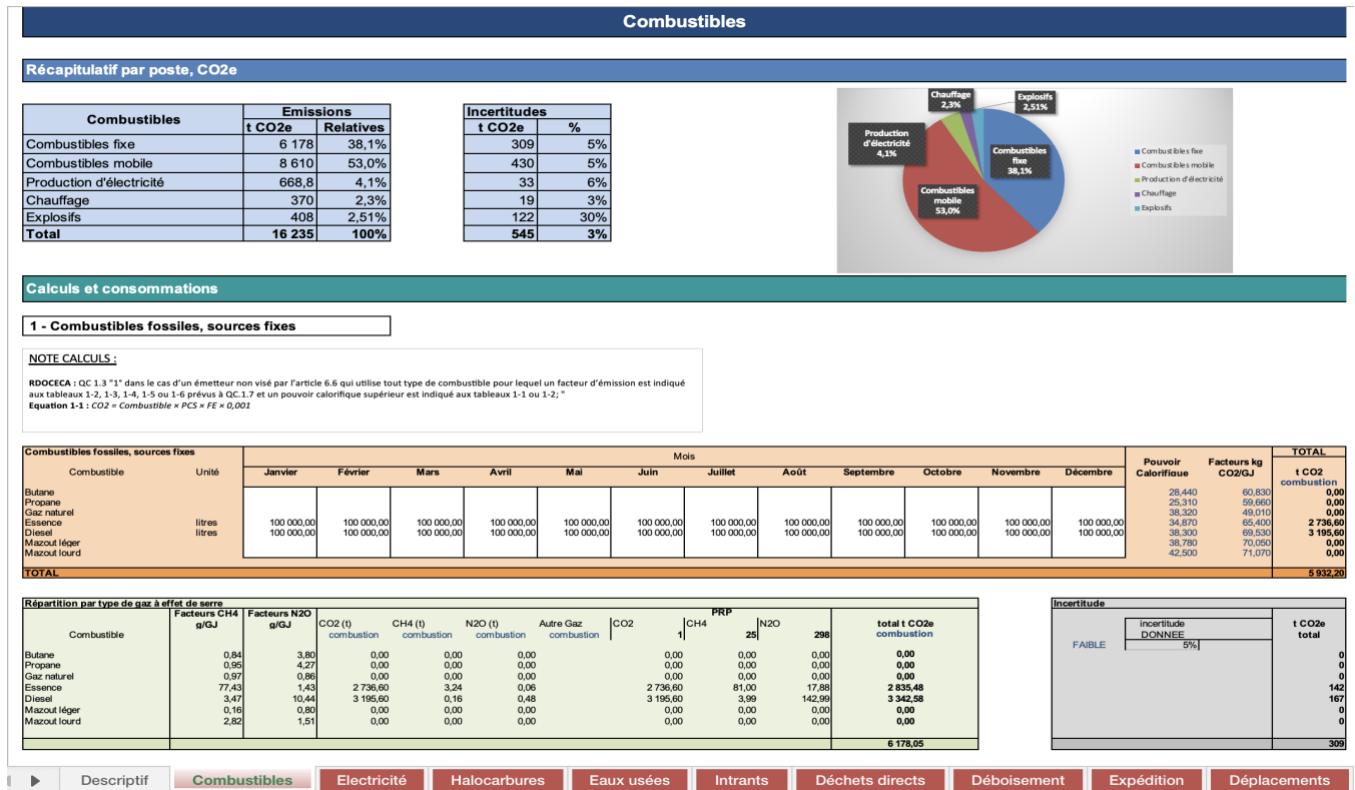


Figure B.2 Page Combustibles outils de calculs d'émissions de GES

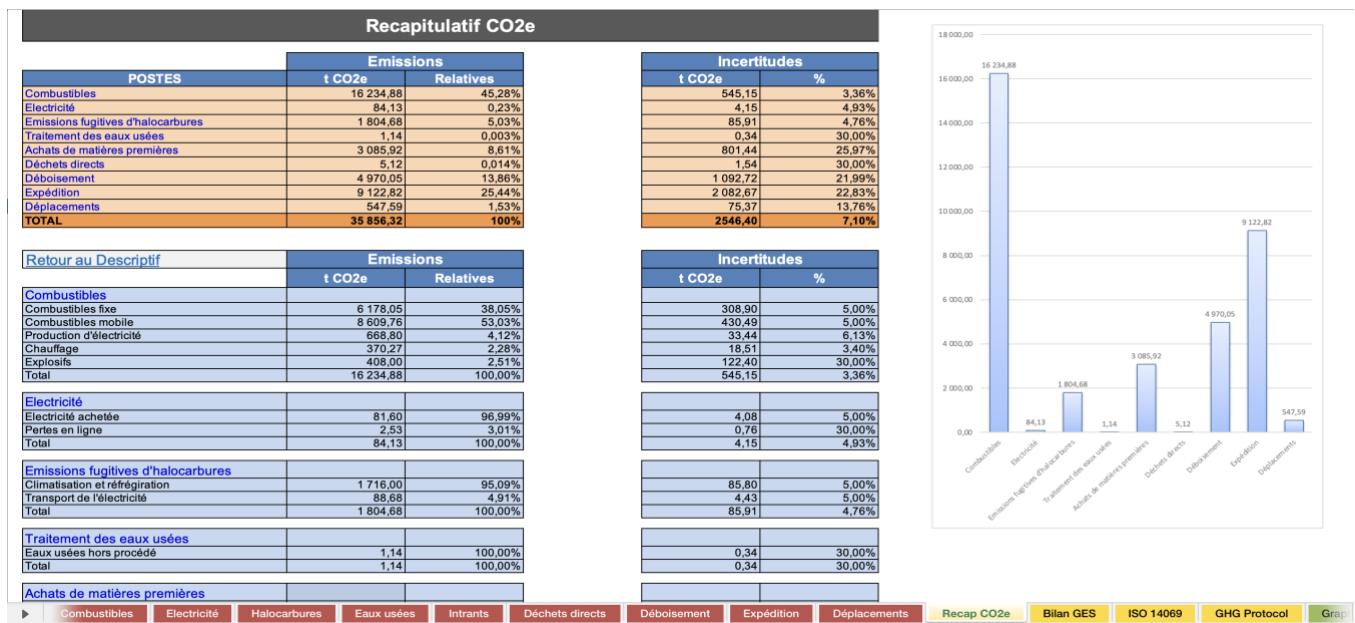


Figure B.3 Page Recap CO2e outils de calculs d'émissions de GES

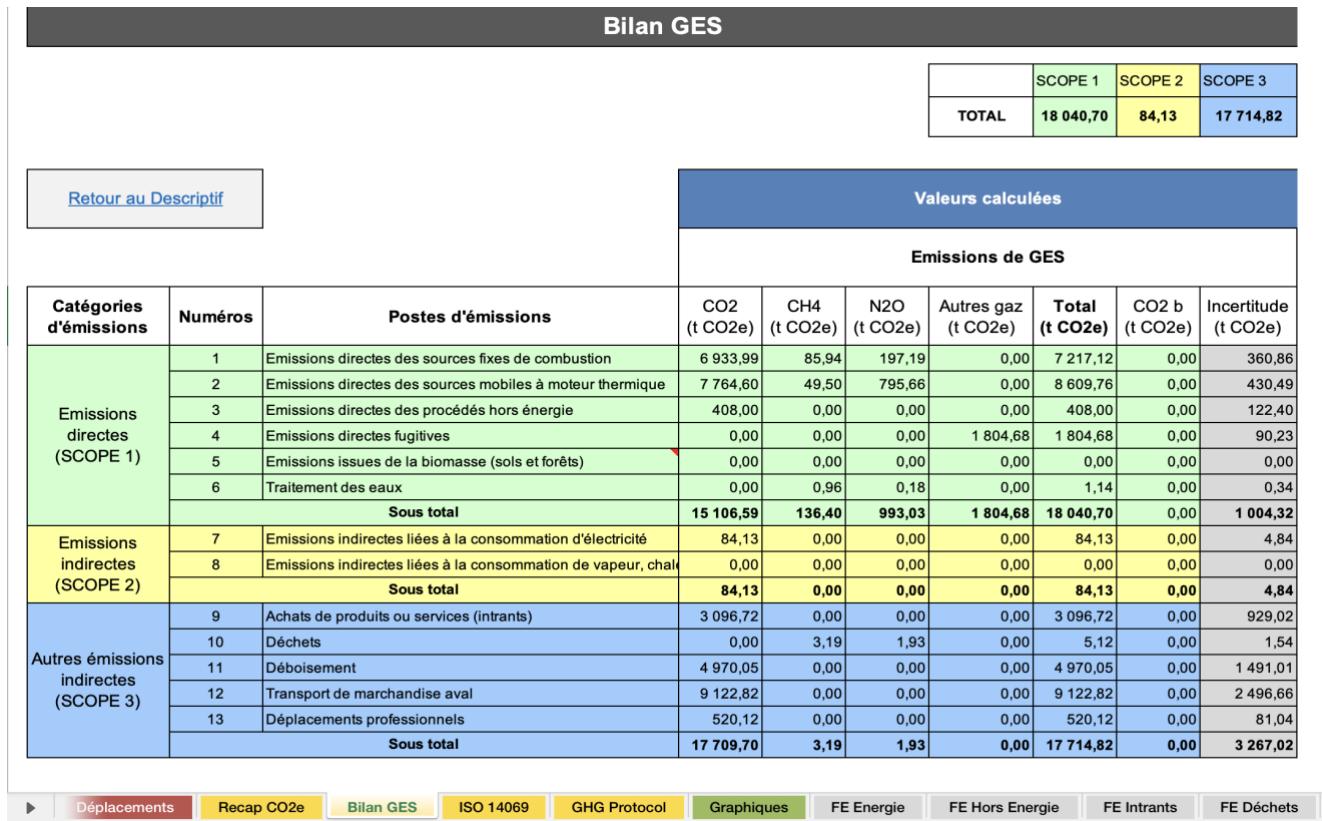


Figure B.4 Page Bilan outils de calculs d'émissions de GES

ISO/TR 14069:2013											
Retour au Descriptif		Valeurs calculées									
Catégories d'émissions	Numéros	Postes d'émissions		Emissions de GES							Emissions supprimées de GES
		CO2 (t CO2e)	CH4 (t CO2e)	N2O (t CO2e)	Gaz fluorés (t CO2e)	Autres gaz (t CO2e)	Total (t CO2e)	CO2 b de combustion (t CO2e)	Autre CO2 b (t CO2e)	Incertitude (t CO2e)	
Scope 1	1	Emissions directes des sources fixes de combustion									
	2	Emissions directes des sources mobiles de combustion									
	3	Emissions directes des procédés									
	4	Emissions directes fugitives									
	5	Emissions directes issues de l'UTCF									
Total Scope 1											
Scope 2	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité									
	7	Emissions indirectes liées à la consommation d'énergie de réseau (hors électricité)									
Total Scope 2											
Scope 3	8	Emissions liées à l'énergie non incluses dans les postes 1 à 7									
	9	Achats de produits									
	10	Biens immobilisés									
	11	Déchets générés									
	12	Transport de marchandise amont et distribution									
	13	Déplacements professionnels									
	14	Actifs en leasing amont									
	15	Investissements									
	16	Transport des visiteurs et des clients									
	17	Transport de marchandise aval et distribution									
	18	Utilisation des produits vendus									
	19	Fin de vie des produits vendus									
	20	Franchise aval									
	21	Loyer aval									
	22	Déplacements domicile travail									
	23	Autres émissions indirectes									
Total Scope 3											

▶ Déplacements Recap CO2e Bilan GES ISO 14069 GHG Protocol Graphiques FE Energie FE Hors Energie FE Intrants FE Déchets FE Expedition FE Déplacements DONNÉES +

Figure B.5 Page norme ISO outils de calculs d'émissions de GES

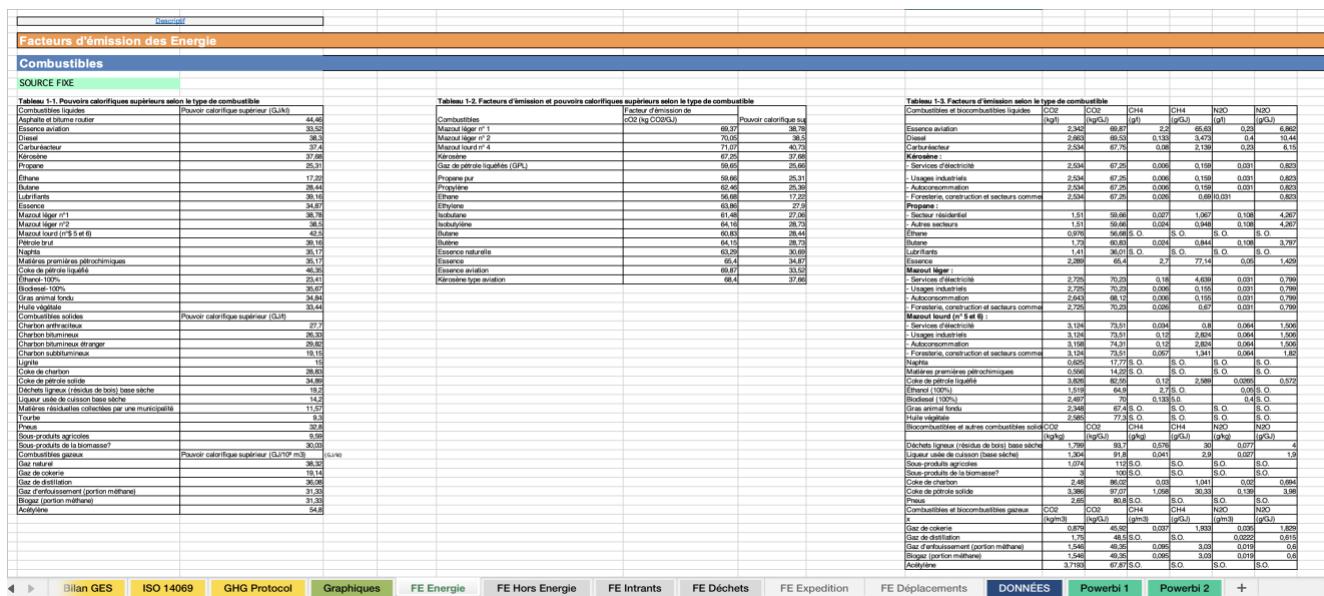
GHG Protocol											
Retour au Descriptif		Valeurs calculées									
Catégories d'émissions	Numéros	Postes d'émissions		Emissions de GES							Emissions évitées de GES
		CO2 (t CO2e)	CH4 (t CO2e)	N2O (t CO2e)	HFCs (t CO2e)	PFCs (t CO2e)	SF6 (t CO2e)	Autres gaz (t CO2e)	Total (t CO2e)	CO2 b (t CO2e)	
Scope 1	1-1	Emissions directes des sources fixes de combustion									
	1-2	Emissions directes des sources mobiles de combustion									
	1-3	Emissions directes des procédés									
	1-4	Emissions directes fugitives									
Total Scope 1											
Scope 2	2-1	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité									
	2-2	Emissions indirectes liées à la consommation de vapeur, chaleur ou froid									
Total Scope 2											
Scope 3	3-1	Produits et services achetés									
	3-2	Biens immobilisés									
	3-3	Emissions liées aux combustibles et à l'énergie (non inclus dans le scope 1 ou le scope 2)									
	3-4	Transport de marchandise amont et distribution									
	3-5	Déchets générés									
	3-6	Déplacements professionnels									
	3-7	Déplacements domicile travail									
	3-8	Actifs en leasing amont									
	3-9	Autres émissions indirectes amont									
	3-10	Transport de marchandise aval et distribution									
	3-11	Transformation des produits vendus									
	3-12	Utilisation des produits vendus									
	3-13	Fin de vie des produits vendus									
	3-14	Acôts en leasing aval									
	3-15	Franchises									
Total Scope 3											

▶ Déplacements Recap CO2e Bilan GES ISO 14069 GHG Protocol Graphiques FE Energie FE Hors Energie FE Intrants FE Déchets FE Expedition FE Déplacements DONNÉES +

Figure B.6 Page norme GHG Protocol outils de calculs d'émissions de GES



Figure B.7 Page Graphiques outils de calculs d'émissions de GES



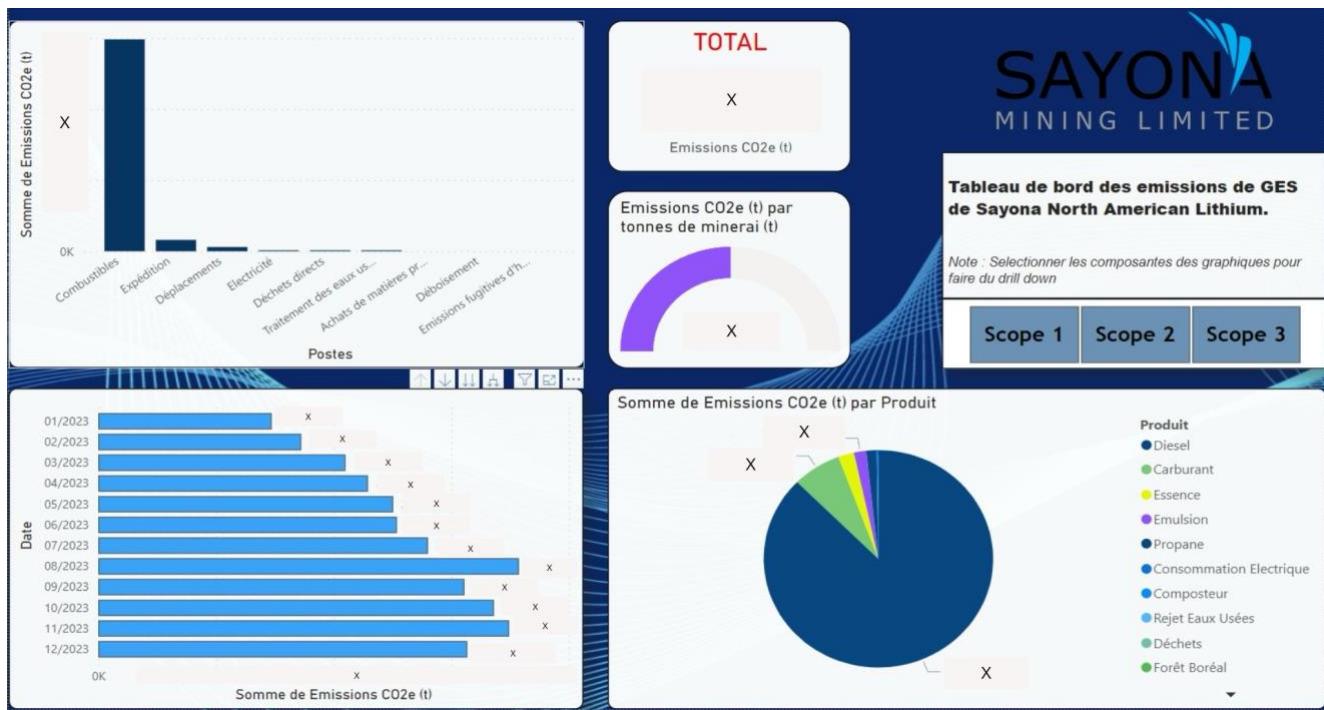


Figure B.9 Tableau de bord Power BI des émissions de GES de Sayona