

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département du Génie de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des
Procédés et Environnement

Développement d'un système digitalisé pour l'évaluation des
émissions de CO₂ équivalent et proposition de leviers de réduction
- Application : Siemens Energy -

Réalisé par : Mohamed Abdelkader ARIBI

Présenté et soutenu publiquement le (22/07/2025)

Composition du jury :

Président :	Yacine KERCHICH	Pr	ENP
Examineur :	Iskander ZOUAGHI	MCA	ENP
Membre du CATI :	M'hamed BOUSBAL	MCB	ENP CATI
Promoteur :	Naima DJELLOULI	MCB	ENP
Promoteur :	Badreddine BOUSBAL	EHS Country Lead	Siemens Energy

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département du Génie de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des
Procédés et Environnement

Développement d'un système digitalisé pour l'évaluation des
émissions de CO₂ équivalent et proposition de leviers de réduction
- Application : Siemens Energy -

Réalisé par : Mohamed Abdelkader ARIBI

Présenté et soutenu publiquement le (22/07/2025)

Composition du jury :

Président :	Yacine KERCHICH	Pr	ENP
Examineur :	Iskander ZOUAGHI	MCA	ENP
Membre du CATI :	M'hamed BOUSBAL	MCB	ENP CATI
Promoteur :	Naima DJELLOULI	MCB	ENP
Promoteur :	Badreddine BOUSBAL	EHS Country Lead	Siemens Energy

ملخص

يتناول هذا المشروع تطوير نظام رقمي لتقييم انبعاثات مكافئ ثاني أكسيد الكربون إلى جانب اقتراح روافع مناسبة للتقليل منها في مركز خدمات تابع لشركة Siemens Energy. يعتمد النظام على بروتوكول GHG لتنظيم البيانات، أتمتة الحسابات وإنتاج نتائج قابلة للاستغلال. كما يدمج حلولاً للحد من الانبعاثات مصممة خصيصاً لكل فئة. تركز البنية التقنية على تقنيات React و Django و PostgreSQL. يستجيب هذا المشروع لتحديات الانتقال إلى اقتصاد منخفض الكربون، و متطلبات تزويد البنى الصناعية بأدوات موثوقة، سهلة الاستخدام و متوافقة مع المعايير الدولية.

الكلمات المفتاحية : التغير المناخي - الانتقال منخفض الكربون - مكافئ ثاني أكسيد الكربون - الرقنة - بروتوكول GHG

Abstract

This final-year project focuses on the development of a digitalized system for assessing CO₂ equivalent emissions along with the proposal of suitable reduction levers, applied to a Siemens Energy service center. The system relies on the GHG Protocol to structure data, automate calculations, and generate actionable results. The solution also incorporates reduction levers tailored to each emissions category. The technical architecture is based on React, Django, and PostgreSQL technologies. This project addresses the current challenges of the low-carbon transition and the need to equip structures with accessible, reliable tools that comply with international standards.

Keywords : Climate change - Low-carbon transition – CO₂ equivalent - Digitalization – GHG Protocol.

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur le développement d'un système digitalisé pour l'évaluation des émissions de CO₂ équivalent ainsi que sur la proposition de leviers de réduction adaptés, appliqués à un centre de service de Siemens Energy. Il s'appuie sur le GHG Protocol pour structurer les données, automatiser les calculs et générer des résultats exploitables. La solution intègre également des leviers de réduction spécifiques à chaque catégorie d'émissions. L'architecture technique repose sur les technologies React, Django et PostgreSQL. Ce projet répond aux enjeux actuels de la transition bas-carbone et à la nécessité de doter les structures d'outils accessibles, fiables et conformes aux standards internationaux.

Mots clés : Changement climatique - Transition bas carbone - CO₂ équivalent - Digitalisation - GHG Protocole.

Dédicaces

À ma petite (ou plutôt grande) famille.

À mon père, sans toi je ne serais pas l'homme que je suis aujourd'hui. Merci pour tout.

Babila et Nazim, ensemble on a formé le premier trio. Notre complicité, nos chamailleries, toutes les bêtises qu'on a faites ... Vous êtes les deux personnes qui ont toujours été à mes côtés dans les hauts comme dans les bas. J'espère avoir été au moins un grand frère exemplaire pour vous.

Allal, Meriem et Kakou, le miroir de mon enfance. Vous animez la maison chaque jour avec vos rires, vos cris et votre naïveté. Que Dieu vous protège.

Plus particulièrement à toi, Allal, mon chouchou, sahbi w machi khoya, je te dédie une partie de cette dédicace comme message à ton futur toi. J'espère que tu suivras mon exemple. Toi qui aimes tant Polytech, j'espère que tu feras tout pour y entrer un jour. Je compte sur toi. Ne me déçois pas, je sais que tu en es capable. (Zemmouri 2025)

À mes grands-mères, Mima et Jides.

À Khaltou Djouher et Malika, j'ai la chance de vous avoir dans ma vie car j'ai deux mères de plus.

À ma tante Fatima, Amina, Hassina, et toutes les autres.

À mes grands-pères décédés, Allal et Ammar, j'aurais aimé que vous me voyiez réussir. Qu'ALLAH vous accorde sa miséricorde.

À mes oncles, Hamid, Mohamed Chabane, Merzouk et tout les autres, merci pour tout votre soutien.

À mes cousins et cousines. Moussa, tu as été comme un grand frère pour moi depuis l'enfance.

Tanina, sans toi, je ne serais pas en train de remercier tout le monde à travers ces mots. Que Dieu protège ton enfant. À Moumoh, Nadir, Souad, Lynda, Doudouche, Amine, Nonor, Mehdi et tous les autres, merci.

À mes amis, Mehdi, mon bras droit. Wail, mon bras gauche.

À mes amis du comité, Younes, Aimad, Chayeb et Raouf, j'ai passé mes meilleurs moments à Polytech avec vous.

À mes amis de prépa, Dany (mon fils), Miloud, Amine, Samy, Alicia ... et tous nos fous rires au jardin.

À tous les membres du CAP et à ceux que j'ai rencontrés pendant mon mandat, en particulier ceux de Charity Trip, Nipou, Zaza, Joey, Raouf, Chinwi, Sofiane et tous les autres.

À mes amis de basket d'Aïn Allah, Adel, Chafik, Popo, Nasro, Islam, et les autres. J'espère que la vie nous recroisera un jour.

À tous mes amis que je n'ai pas cités.

À toi, Mathya, la dernière personne à être entrée dans ma vie et celle avec qui je souhaite passer le reste de mes jours. Que Dieu nous garde l'un pour l'autre.

Pour finir et comme on dit, le meilleur pour la fin.

À toi, ma chère maman. Je pourrais rédiger un rapport entier rien que pour te remercier et ce ne serait toujours pas suffisant. Tu es sans l'ombre d'un doute la femme la plus forte au monde. Rien de ce que je dirai ne saurait être à la hauteur de tout ce que tu m'as donné, de tout ce que tu as sacrifié pour moi. Tu es ma source d'inspiration, mon idole. Je te dédie ce travail ainsi que tous mes anciens et futures accomplissements.

Je t'aime du plus profond de mon cœur.

Peace.

Remerciements

Louange à ALLAH, le Clément et le Miséricordieux pour m'avoir accordé la force et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, Madame Naima DJELLOULI et Monsieur Badreddine BOUSBAL pour leur dévouement, leurs conseils avisés et leur aide précieuse tout au long de la rédaction de ce mémoire. Leur soutien et leur expertise ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury, Monsieur Yacine KERCHICHE, Monsieur Iskander ZOUAGHI et Monsieur M'hamed BOUSBAL pour avoir pris le temps d'évaluer mon travail et pour leurs critiques constructives. Leurs remarques rigoureuses et pertinentes m'ont permis d'enrichir et d'améliorer considérablement ce mémoire.

Mes sincères remerciements vont également à l'ensemble de mes enseignants. C'est grâce à la qualité de leur enseignement, à leur patience et à leur engagement que j'ai pu atteindre cette étape déterminante de mon parcours académique.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à Siemens Energy pour m'avoir offert une opportunité de stage particulièrement enrichissante, qui a grandement contribué à ma formation professionnelle.

Je remercie chaleureusement tous les membres du personnel pour leur accueil, leur disponibilité et leur coopération tout au long de mon stage.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir offert cette expérience unique et inoubliable qui restera gravée dans ma mémoire et qui a joué un rôle fondamental dans mon développement personnel et professionnel.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	11
1 Contexte, Problématique et Objectifs du Projet	13
1.1 Introduction	13
1.2 Contexte général et enjeux environnementaux	13
1.3 Présentation de l'entreprise d'accueil	15
1.4 Problématique et justification du projet	16
1.5 Objectifs du projet	17
1.6 Démarche méthodologique et approche de développement	18
1.7 Délimitation, périmètre et état d'avancement du système	19
1.7.1 Périmètre fonctionnel couvert	19
1.7.2 Délimitation technique	19
1.7.3 État d'avancement du système	20
1.8 Conclusion	20
2 Cadre Théorique et Technologique du Projet	21
2.1 Introduction	21
2.2 Les GES : définitions, sources et impacts	21
2.2.1 Définition et rôle dans l'équilibre climatique	22
2.2.2 Principaux GES régulés	23
2.2.3 Origines des émissions : naturelles et anthropiques	24

2.2.4	Impacts sur le climat et les écosystèmes	25
2.2.5	Évaluation des émissions : importance et enjeux	26
2.3	Le GHG Protocol : cadre de référence méthodologique	26
2.3.1	Présentation générale du GHG Protocol	26
2.3.2	Scope 1 : Émissions directes	28
2.3.3	Scope 2 : Émissions indirectes liées à l'énergie	32
2.3.4	Scope 3 : Émissions indirectes liées à la chaîne de valeur	33
2.4	Stratégies de réduction des émissions : typologie des leviers	50
2.4.1	Classification des leviers de réduction	50
2.4.2	Leviers par périmètre d'émission	51
2.4.2.1	Leviers du Scope 1 – Émissions directes	51
2.4.2.2	Leviers du Scope 2 – Émissions indirectes liées à l'énergie	51
2.4.2.3	Leviers du Scope 3 – Émissions indirectes de la chaîne de valeur	52
2.4.3	Critères de sélection des leviers	52
2.5	Apports de la digitalisation à la gestion environnementale	53
2.5.1	Le numérique au service de la transition bas-carbone	54
2.5.2	Typologie des outils digitaux pour la gestion des GES	55
2.5.3	Limites, enjeux éthiques et perspectives d'évolution	56
2.6	Revue des outils existants et positionnement de la solution proposée	56
2.6.1	Panorama des outils numériques de comptabilité carbone disponibles	57
2.6.2	Limites observées dans les solutions actuelles	57
2.6.3	Positionnement technologique de la solution proposée	58
2.7	Conclusion	59
3	Conception et Développement du Système Digitalisé	60
3.1	Introduction	60
3.2	Objectifs et portée du système développé	60
3.3	Architecture générale du système	61
3.3.1	Vue d'ensemble fonctionnelle	62
3.3.2	Modules principaux	63
3.3.3	Mode de fonctionnement actuel	64

3.4	Parcours utilisateur et interface	64
3.4.1	Sélection initiale des catégories de Scope	65
3.4.2	Téléversement des données	65
3.4.3	Dashboard final	66
3.5	Logique de calcul	66
3.5.1	Algorithme 1 – Traitement des données d’entrée par catégorie	68
3.5.2	Algorithme 2 – Agrégation des émissions par Scope	68
3.5.3	Algorithme 3 – Affichage conditionnel des leviers de réduction	68
3.6	Intégration des leviers de réduction	69
3.7	Limites de la version actuelle et perspectives d’évolution	69
3.8	Conclusion	71
4	Application du Système à un Cas Réel : Siemens Energy	72
4.1	Introduction	72
4.2	Périmètre de l’étude et cadre temporel	72
4.3	Catégories d’émissions retenues et méthode de calcul appliquées	73
4.4	Résultats des émissions par scope et par catégorie	75
4.5	Analyse critique des résultats et leviers de réduction proposés	76
4.6	Évaluation de la pertinence du système développé	79
4.7	Conclusion	81
5	Valorisation et Modèle Économique	82
5.1	Introduction	82
5.2	Valorisation de la solution TraceLess	82
5.3	Positionnement stratégique de TraceLess	83
5.4	Modèle économique et perspectives de développement	84
5.5	Conclusion	86
	Conclusion générale	87
	Bibliographie	89
	Annexes	93

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les pratiques actuelles de gestion des émissions de GES et les apports du système digitalisé proposé.	17
2.1	Comparaison des périmètres d'émissions du GHG Protocol	28
3.1	Résumé des modules logiciels constituant l'architecture du système.	64
3.2	Exemple de structure attendue pour un fichier CSV à intégrer dans le système .	66
3.3	Structure type d'un tableau de priorisation multicritère des leviers de réduction.	69
3.4	Limites identifiées du système actuel et perspectives d'évolution envisagées. . . .	71
4.1	Leviers de réduction proposés pour le Scope 1	77
4.2	Leviers de réduction proposés pour le Scope 2	78
4.3	Leviers de réduction proposés pour le Scope 3	79

Table des figures

1.1	Évolution de la température moyenne mondiale de 1850 à 2020 (anomalie relative à 1850–1900). Les seuils de 1,5°C et 2°C fixés par l’Accord de Paris sont représentés [1]	14
1.2	Schéma des émissions directes et indirectes selon les Scopes 1, 2 et 3 du GHG Protocol [2]	16
2.1	Schéma illustrant le mécanisme de l’effet de serre [3]	22
2.2	Répartition mondiale des émissions de GES par gaz [4]	23
2.3	Potentiels de réchauffement global (PRG) à 100 ans des principaux GES [5] . . .	24
2.4	Répartition des émissions du Scopes 1, 2 et 3 [6]	27
2.5	Catégorisation des émissions du Scope 3 selon le GHG Protocol en amont et en aval	34
2.6	Architecture verticale d’un outil digital de comptabilité carbone	54
3.1	Architecture technique du système digitalisé	62
3.2	Étapes principales du parcours utilisateur dans l’interface du système	65
3.3	Schéma de la logique de calcul des émissions dans le système.	67
4.1	Façade du centre de service Hammadi – Siemens Energy	73
4.2	Résultats d’émissions directes – Scope 1 (extrait du dashboard du système) . . .	75
4.3	Émissions de la chaîne de valeur – Scope 3 (extrait du dashboard du système) .	76
5.1	Identité visuelle de la solution TraceLess : logo officiel	83
5.2	Business Model Canvas de TraceLess	85
0.3	Extrait de code Python – Méthode de calcul des émissions	93
0.4	Extrait de la base de données PostgreSQL	94
0.5	Extrait de code de React	95

Liste des acronymes

- **ACID** : Atomicity, Consistency, Isolation, Durability
- **ADEME** : Agence de la Transition Écologique
- **AMC** : Analyse Multicritère
- **API** : Application Programming Interface
- **CAPEX** : Capital Expenditure
- **CDP** : Carbon Disclosure Project
- **CSV** : Comma-Separated Values
- **CSRD** : Corporate Sustainability Reporting Directive
- **DEFRA** : Department for Environment, Food and Rural Affairs
- **DEEE** : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques
- **EEIO** : Environmentally Extended Input-Output
- **EPA** : Environmental Protection Agency
- **EPdC** : Éco-profil de déclaration de conformité
- **ERP** : Enterprise Resource Planning
- **ESG** : Environnement, Social et Gouvernance
- **ESTEL** : Entreprise de Signalisation et Télécommunication Ferroviaire
- **FE** : Facteur d'Émission
- **GHG Protocol** : Greenhouse Gas Protocol
- **GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- **GLEC** : Global Logistics Emissions Council
- **IoT** : Internet of Things
- **ISO** : Organisation internationale de normalisation
- **KPI** : Key Performance Indicator
- **OPEX** : Operational Expenditure
- **PEF** : Product Environmental Footprint
- **PME** : Petites et Moyennes Entreprises
- **PRG** : Potentiel de Réchauffement Global
- **REST** : Representational State Transfer
- **RSE** : Responsabilité Sociétale des Entreprises
- **SaaS** : Software as a Service
- **SBTi** : Science Based Targets initiative
- **SNTF** : Société Nationale des Transports Ferroviaires
- **S.p.A** : Société par Actions
- **TCFD** : Task Force on Climate-related Financial Disclosures
- **TRL** : Technology Readiness Level
- **VTC** : Véhicule de Transport avec Chauffeur
- **WBCSD** : World Business Council for Sustainable Development
- **WRI** : World Resources Institute

Introduction générale

“On ne peut améliorer que ce que l’on mesure.”

Peter Drucker

Le changement climatique représente aujourd’hui une réalité incontournable, aux conséquences multiples sur les équilibres environnementaux, économiques et sociaux. L’accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l’atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), est identifiée comme la cause principale du réchauffement climatique. Dans ce contexte, les entreprises industrielles, particulièrement énergivores, sont appelées à repenser leurs modèles de développement en intégrant des objectifs clairs de réduction de leurs émissions.

À l’échelle internationale, des référentiels méthodologiques ont émergé pour guider les organisations dans cette transition, parmi lesquels le Greenhouse Gaz (GHG) Protocol s’impose comme la norme la plus largement adoptée pour la quantification et le reporting des émissions de GES. Ce cadre distingue trois périmètres : Scope 1 (émissions directes), Scope 2 (émissions indirectes liées à l’énergie achetée), et Scope 3 (autres émissions indirectes issues de la chaîne de valeur). Cette catégorisation permet une lecture complète et hiérarchisée de l’empreinte carbone d’une organisation.

Cependant, en dépit de la clarté du cadre conceptuel, la mise en œuvre concrète de la comptabilité carbone reste confrontée à plusieurs freins, en particulier dans les pays en développement : manque d’outils numériques adaptés, données éparses ou non standardisées, absence de solutions localement contextualisées, et faible intégration des enjeux environnementaux dans les systèmes d’information des entreprises. L’enjeu ne se limite plus à mesurer : il faut aussi faciliter, automatiser, analyser et recommander.

C’est dans cette optique que s’inscrit le présent projet de fin d’études. Il vise à concevoir, développer et appliquer un système digitalisé permettant d’évaluer les émissions de CO₂ équivalent d’une entreprise industrielle selon les principes du GHG Protocol, tout en proposant des leviers de réduction concrets et adaptés. Le système repose sur une architecture web modulaire, construite autour de modules de traitement de données, de calcul automatisé, de visualisation interactive et de génération de recommandations environnementales.

L’application du système s’est faite sur un cas réel : le centre de service de Siemens Energy situé à Hammadi. Acteur majeur du secteur énergétique algérien, cette entreprise s’est engagée à atteindre la neutralité carbone à l’horizon 2030. Ce projet vient donc répondre à un besoin concret d’outillage opérationnel, dans un contexte local encore peu structuré en matière de reporting climatique.

L'objectif général est de démontrer que la digitalisation peut devenir un levier d'efficacité environnementale, en rendant la comptabilité carbone plus accessible, plus rigoureuse et plus exploitable. L'approche développée repose sur les principes suivants :

- conformité méthodologique (respect des référentiels GHG),
- automatisation partielle des calculs (facteurs d'émission manuels mais structurés),
- visualisation synthétique et claire des résultats,
- génération de recommandations simples et contextualisées.

Pour répondre à cette ambition, le mémoire est structuré en cinq chapitres complémentaires :

- **Chapitre 1 – Contexte, Problématique et Objectifs du Projet** : présente les enjeux climatiques mondiaux, les exigences pesant sur les entreprises, la stratégie de Siemens Energy, ainsi que la problématique et les objectifs poursuivis par le projet.
- **Chapitre 2 – Cadre Théorique et Technologique du Projet** : établit les fondements scientifiques du travail, en détaillant les types de GES, le fonctionnement du GHG Protocol, la typologie des leviers de réduction et les apports de la digitalisation à la comptabilité carbone.
- **Chapitre 3 – Conception et Développement du Système Digitalisé** : décrit l'architecture technique du système, ses modules principaux, l'interface utilisateur, la logique de calcul mise en œuvre et les limites techniques rencontrées.
- **Chapitre 4 – Application du Système à un Cas Réel : Siemens Energy** : expose les résultats obtenus sur des données réelles du centre de Hammadi, les méthodes de calcul appliquées, les émissions par Scope et par catégorie, et les leviers de réduction proposés.
- **Chapitre 5 – Valorisation et Modèle Économique** : propose des pistes de valorisation du système développé, son positionnement stratégique sur le marché, et une esquisse de modèle économique permettant un déploiement plus large, notamment auprès des PME industrielles.

Ce travail ambitionne ainsi de combiner rigueur environnementale et innovation numérique, pour contribuer, à son échelle, à la construction d'outils opérationnels de transition énergétique.

Chapitre 1

Contexte, Problématique et Objectifs du Projet

1.1 Introduction

Dans un contexte mondial où le dérèglement climatique constitue une menace croissante pour les équilibres environnementaux, économiques et sociaux, les entreprises sont appelées à repenser leurs modèles opérationnels en intégrant des objectifs ambitieux de réduction des émissions de GES. La pression exercée par les régulateurs, les investisseurs, les consommateurs et la société civile incite désormais les organisations à se doter d'outils de pilotage environnemental robustes, transparents et conformes aux standards internationaux.

Le présent projet de fin d'études s'inscrit dans cette dynamique globale de transition bas carbone. Il vise à concevoir un système digitalisé permettant l'évaluation des émissions de CO₂ équivalent d'une entreprise industrielle selon les principes méthodologiques du GHG Protocol, tout en proposant des leviers de réduction adaptés aux profils d'émission identifiés. Siemens Energy constitue le cadre d'application de cette initiative, illustrant l'enjeu concret de mise en œuvre locale d'une stratégie de décarbonation alignée sur les ambitions climatiques internationales.

Ce premier chapitre présente les fondements du projet. Il débute par un rappel du contexte environnemental mondial et des enjeux liés à la comptabilité carbone, puis introduit l'entreprise d'accueil et ses engagements. Il détaille ensuite la problématique à laquelle répond le système développé, les objectifs poursuivis, la démarche méthodologique adoptée, ainsi que le périmètre couvert et l'état d'avancement actuel de la solution.

1.2 Contexte général et enjeux environnementaux

Le changement climatique constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels l'humanité est confrontée. L'augmentation des concentrations atmosphériques de GES, en particulier le dioxyde de carbone (CO₂), est largement reconnue comme la principale cause de ce dérèglement climatique. Depuis la révolution industrielle, les activités humaines, notamment la combustion d'énergies fossiles, l'agriculture intensive et les procédés industriels, ont entraîné une hausse significative des émissions de GES. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la température moyenne mondiale a déjà augmenté d'environ 1,1 °C par rapport à l'ère préindustrielle, et ce réchauffement devrait dépasser les 1,5 °C dès les années

2030 si des actions radicales ne sont pas mises en œuvre [7]. Cette évolution est illustrée dans la Figure 1.1, qui retrace l'augmentation de la température moyenne mondiale depuis 1850 et met en évidence le franchissement du seuil d'alerte climatique fixé par l'Accord de Paris.

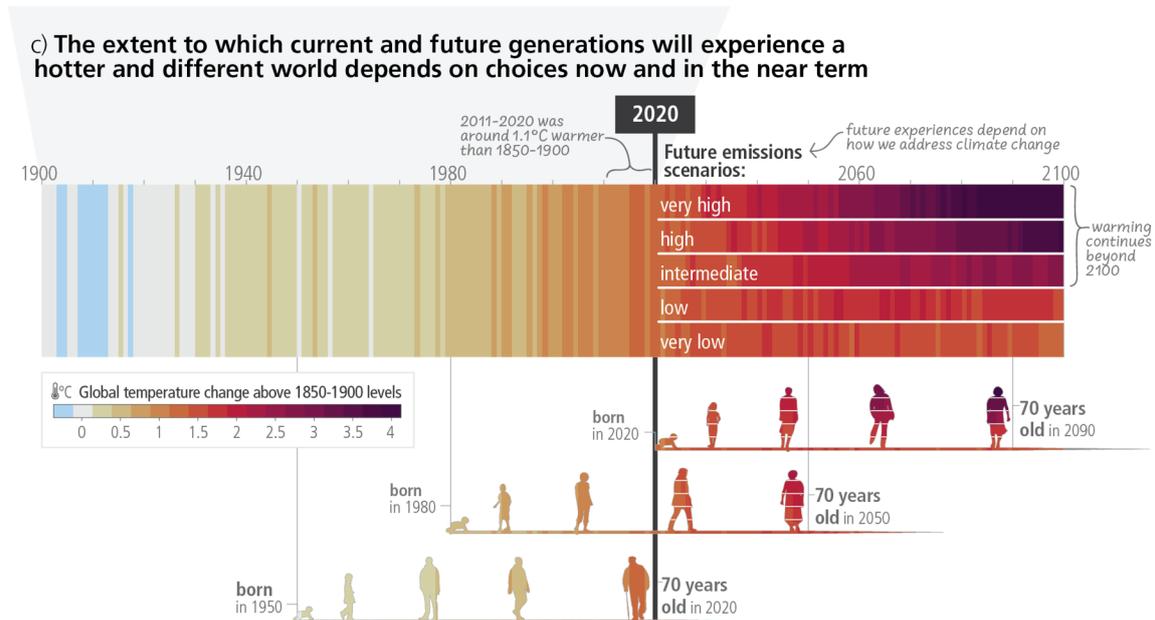


FIGURE 1.1 – Évolution de la température moyenne mondiale de 1850 à 2020 (anomalie relative à 1850–1900). Les seuils de 1,5°C et 2°C fixés par l'Accord de Paris sont représentés [1]

Face à cette urgence, des engagements internationaux ont vu le jour, tels que l'Accord de Paris (2015), qui vise à limiter l'augmentation de la température mondiale bien en dessous de 2 °C, de préférence à 1,5 °C. Pour atteindre ces objectifs, les États, les entreprises et les citoyens sont appelés à réduire drastiquement leurs émissions de GES. Les entreprises industrielles, en particulier, sont appelées à jouer un rôle central en intégrant des stratégies de décarbonation dans leurs processus productifs et organisationnels [8].

Dans ce contexte, le bilan carbone s'impose comme un outil stratégique. Il permet d'identifier, de quantifier et de hiérarchiser les sources d'émissions directes (Scope 1), indirectes liées à l'énergie (Scope 2) et autres émissions indirectes de la chaîne de valeur (Scope 3), selon la classification du GHG Protocol, aujourd'hui largement adopté au niveau international [9]. L'enjeu n'est pas uniquement environnemental : il est aussi économique, réglementaire et réputationnel. En effet, les pressions exercées par les régulateurs, les investisseurs et les consommateurs encouragent de plus en plus les entreprises à adopter une démarche proactive en matière de responsabilité environnementale [10].

Ainsi, la digitalisation des outils de gestion environnementale représente une opportunité majeure. Elle permet une meilleure collecte des données, une automatisation des calculs, et ouvre la voie à des systèmes intelligents capables de proposer des stratégies de réduction adaptées aux spécificités des entreprises. Le présent projet s'inscrit dans cette dynamique, en proposant le développement d'un système digitalisé d'évaluation et de réduction des émissions de CO₂ équivalent, avec Siemens Energy comme terrain d'application pilote [11].

1.3 Présentation de l'entreprise d'accueil

Siemens est un conglomérat technologique allemand de renommée mondiale, opérant principalement dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de la santé et des infrastructures. Fondée au XIX siècle, l'entreprise s'est imposée comme un leader mondial de l'innovation industrielle grâce à un patrimoine riche en inventions majeures, une capacité d'adaptation aux mutations technologiques, et une forte implantation internationale. Son histoire en Algérie débute dès 1857, avec l'installation du premier câble télégraphique reliant Annaba à Cagliari, puis se consolide par l'ouverture d'un bureau de représentation à Alger en 1962.

Aujourd'hui, Siemens emploie plus de 300 personnes en Algérie et y déploie une large gamme d'activités couvrant notamment les domaines de l'énergie, des transports, de l'eau, de l'industrie et de la santé. Ses activités locales comprennent :

- Des services d'ingénierie technique et informatique industrielle.
- La vente et la maintenance d'équipements électriques industriels.
- L'assemblage, la réparation et la distribution d'équipements médicaux.
- La fourniture de solutions technologiques pour les infrastructures énergétiques et industrielles.

Au fil des années, Siemens a participé à plusieurs projets structurants en Algérie. On peut citer notamment la réalisation de la première ligne du métro d'Alger, l'équipement des stations de pompage pour le transport du pétrole, ainsi que la modernisation de la signalisation ferroviaire nationale via sa filiale Entreprise de Signalisation et Télécommunication Ferroviaire (ESTEL) qui est une joint-venture entre Siemens et Sonelgaz, en partenariat avec la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF). Le groupe est aujourd'hui représenté par trois principales entités en Algérie : Siemens Société par Actions (S.p.A.) (industrie et automation), Siemens Healthineers (technologies médicales) et Siemens Energy (énergie) [12].

C'est cette dernière entité qui accueille le présent projet. Siemens Energy est la branche spécialisée dans les technologies énergétiques du groupe Siemens. Devenue une entreprise indépendante en 2020 à la suite d'une scission stratégique, elle se concentre sur la fourniture de solutions innovantes dans les domaines de la production d'électricité, des énergies renouvelables (éolien terrestre et offshore, solutions hybrides), ainsi que des systèmes de transport et de distribution d'énergie. Au niveau mondial, Siemens Energy est présente dans plus de 90 pays et contribue à environ 30% de la production électrique mondiale [13].

En Algérie, Siemens Energy est engagée dans plusieurs projets stratégiques pour accompagner la modernisation et la transition du système énergétique national. L'entreprise intervient principalement dans la fourniture, l'installation et la maintenance de turbines à gaz, de systèmes de contrôle industriel, de transformateurs et d'équipements haute tension. Elle travaille en partenariat avec des acteurs nationaux comme Sonelgaz et Sonatrach pour améliorer la performance, la sécurité et la durabilité du réseau électrique algérien.

Consciente des enjeux liés au dérèglement climatique, Siemens Energy a adopté une stratégie mondiale de décarbonation visant à atteindre la neutralité carbone de ses opérations d'ici 2030 [13]. Cette ambition se traduit localement par l'exploration de solutions plus efficaces sur le plan énergétique et environnemental. Le développement d'un outil digitalisé de suivi, d'analyse et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, conforme au GHG Protocol, s'inscrit directement dans cette logique. Il représente une étape importante dans la mise en œuvre d'une gestion environnementale proactive, en phase avec les futures exigences réglementaires, les attentes sociétales et les standards internationaux.

1.4 Problématique et justification du projet

Face à l'accélération des dérèglements climatiques, la nécessité d'une réduction massive et rapide des émissions de GES est désormais largement reconnue par la communauté scientifique et les institutions internationales. Selon le dernier rapport du GIEC, les émissions mondiales doivent être réduites d'au moins 43% d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2019 pour espérer limiter le réchauffement à +1,5°C [7]. Les entreprises industrielles sont appelées à jouer un rôle central dans cet effort, en intégrant la mesure, la gestion et la réduction de leur empreinte carbone dans leurs processus décisionnels.

Dans ce contexte, l'évaluation des émissions de CO₂ équivalent constitue une étape incontournable pour initier toute démarche environnementale structurée. Le GHG Protocol, référence méthodologique internationalement reconnue, catégorise les émissions de GES en trois périmètres (ou "scopes") [9] :

- **Scope 1** : Émissions directes liées aux activités contrôlées par l'entreprise (ex. combustion de carburants, procédés industriels).
- **Scope 2** : Émissions indirectes associées à la consommation d'électricité ou de chaleur.
- **Scope 3** : Autres émissions indirectes, en amont ou en aval, dans la chaîne de valeur (fournisseurs, transports, usage des produits, déchets, etc.)

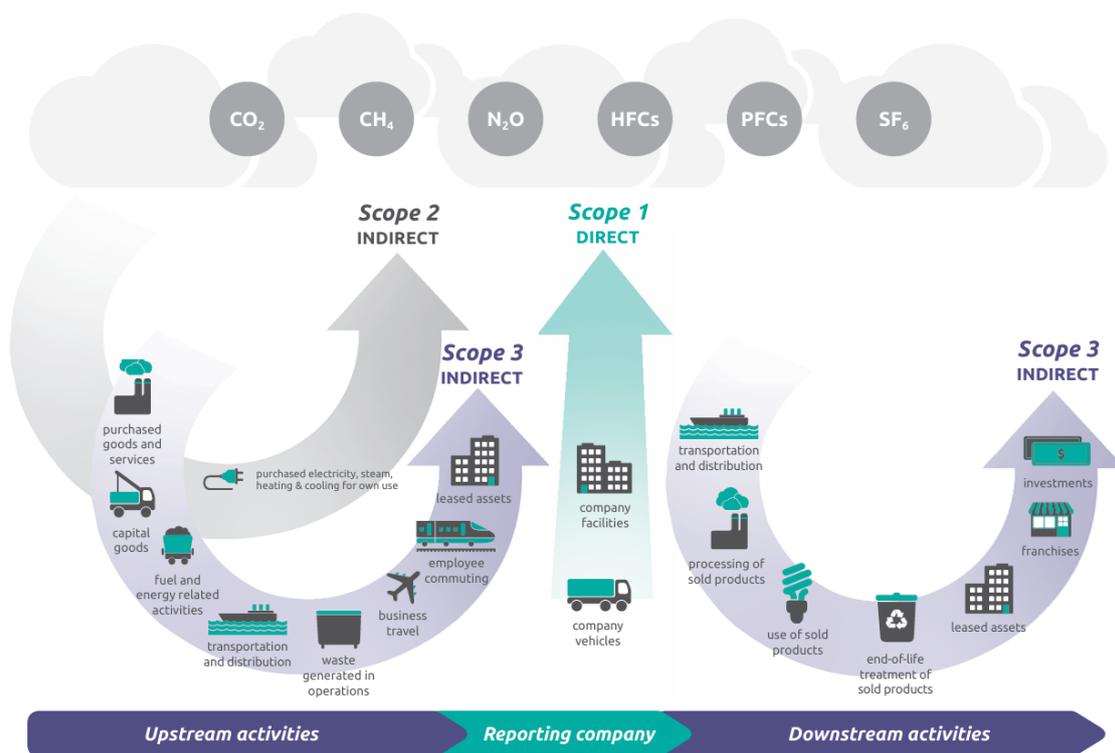


FIGURE 1.2 – Schéma des émissions directes et indirectes selon les Scopes 1, 2 et 3 du GHG Protocol [2]

Or, dans de nombreuses entreprises, notamment dans les pays en développement, le bilan carbone reste soit inexistant, soit réalisé de manière manuelle, ponctuelle et non automatisée. L'absence d'outils numériques dédiés constitue un frein à la régularité et à la fiabilité de ces analyses, rendant difficile la prise de décision en matière de transition énergétique.

Siemens Energy, acteur clé du secteur énergétique, s'est engagée à atteindre la neutralité carbone opérationnelle à l'horizon 2030. Toutefois, la déclinaison de cette ambition à l'échelle locale, notamment en Algérie, se heurte à plusieurs contraintes : dispersion des données, absence d'outils numériques intégrés, manque de standardisation dans le traitement des informations environnementales, et faible maturité réglementaire en matière de reporting GES.

Par ailleurs, la simple mesure des émissions ne suffit plus : il devient essentiel d'associer aux résultats du bilan carbone des pistes concrètes de réduction, adaptées aux spécificités opérationnelles de l'entreprise. Cette logique appelle le développement de systèmes intelligents ou semi-intelligents capables de recommander des actions à fort impact environnemental et économiquement viables. Comme le souligne Eleftheriadis Anagnostopoulou [14], les outils numériques conçus pour les Petites et Moyennes Entreprises (PME) permettent non seulement d'automatiser le calcul de l'empreinte carbone mais aussi d'orienter la décision stratégique, à condition qu'ils soient contextualisés et intégrés dans des environnements métiers réels.

TABLE 1.1 – Comparaison entre les pratiques actuelles de gestion des émissions de GES et les apports du système digitalisé proposé.

Critère	Pratiques actuelles	Système digitalisé proposé
Mode de calcul des émissions	Manuel ou absent	Automatisé, structuré selon le GHG Protocol
Aide à la décision	Non intégrée	Suggestion de leviers de réduction adaptés
Fréquence de mise à jour	Ponctuelle ou annuelle	Possibilité de suivi périodique
Accessibilité des données	Dispersée et hétérogène	Centralisée, homogène et exploitable
Conformité aux standards	Faible traçabilité méthodologique	Alignement avec les normes internationales (GHG Protocol)

Ainsi, la problématique que soulève ce projet est la suivante : Comment concevoir un système digitalisé, basé sur le GHG Protocol, capable d'automatiser l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre d'une entreprise industrielle comme Siemens Energy, tout en proposant des leviers de réduction adaptés aux profils d'émissions identifiés ?

Cette problématique justifie le développement d'un système informatique innovant, à la fois outil d'analyse, de visualisation et d'aide à la décision. Ce système vise à renforcer l'autonomie des entreprises industrielles dans la gestion de leur performance environnementale, et à répondre aux futures obligations de transparence climatique et de durabilité.

1.5 Objectifs du projet

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche d'innovation environnementale visant à doter une entreprise d'un outil numérique adapté à la mesure, l'analyse et l'optimisation de son empreinte carbone. Dans un contexte où les pressions réglementaires, les exigences de transparence et les engagements volontaires en matière de durabilité se renforcent, il devient impératif de disposer d'un système structuré, automatisé et conforme aux standards internationaux pour suivre ses émissions de GES.

L'objectif principal est de concevoir un système automatisé et répliquable, capable de transformer des données d'activité (saisies utilisateur, fichiers Excel ou bases internes) en un bilan carbone fiable, assorti de recommandations personnalisées de réduction des émissions basées sur des règles métiers et des bonnes pratiques industrielles.

Pour structurer cette ambition, plusieurs objectifs spécifiques sont poursuivis :

1. **Gestion et validation des données d'entrée** : développer des modules pour importer et contrôler la qualité des données source (activités, consommations, kilométrages, etc.), afin d'assurer une traçabilité complète.
2. **Automatisation partielle des calculs** : implémenter les formules de conversion des données d'activité en émissions de CO₂ équivalent sur les trois scopes, à partir de facteurs d'émission standards (Base Carbone Agence de la Transition Écologique (ADEME), Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), etc.) intégrés manuellement dans le code. Cette approche garantit la rigueur méthodologique tout en posant les bases pour une future mise à jour automatisée.
3. **Visualisation interactive** : concevoir une interface web offrant aux utilisateurs la possibilité d'explorer les résultats, de filtrer les données et d'identifier rapidement les postes les plus émissifs.
4. **Module de recommandations** : intégrer un moteur simple de suggestions, s'appuyant sur des règles conditionnelles associées à chaque type d'émission (par exemple : optimisation énergétique, recours aux renouvelables, efficacité logistique).
5. **Modularité et répliquabilité** : structurer la solution de façon modulaire pour qu'elle soit facilement adaptable à d'autres filiales ou entreprises industrielles, en particulier des PME, dans une logique d'industrialisation rapide.
6. **Validation opérationnelle** : appliquer la solution sur un jeu de données réelles de Siemens Energy pour valider les résultats et évaluer la pertinence des recommandations.

Cette démarche s'inspire de travaux récents sur la transformation numérique durable des PME, qui soulignent à la fois l'importance d'une architecture modulaire et agile, et la nécessité d'intégrer les enjeux environnementaux au cœur de la stratégie numérique [15]. L'objectif final est de proposer une solution hybride, mêlant rigueur méthodologique (conformité avec le GHG Protocol) et facilité d'usage, capable d'accompagner les organisations dans leur transition bas carbone.

1.6 Démarche méthodologique et approche de développement

La réalisation de ce projet repose sur une méthodologie structurée combinant rigueur normative, pragmatisme de développement, et adaptation aux contraintes techniques réelles du contexte d'entreprise. L'approche adoptée s'inspire des standards de comptabilité carbone, en particulier ceux du GHG Protocol [9], tout en tenant compte de la limitation d'accès aux bases de données officielles des facteurs d'émission, ce qui a nécessité leur intégration manuelle dans l'environnement de développement.

Le processus a été décomposé en quatre phases principales. La première a consisté en un cadrage fonctionnel et technique du besoin au sein de Siemens Energy : il s'agissait d'identifier les postes d'émissions significatifs, les types de données disponibles, ainsi que les unités et formats nécessaires pour un calcul rigoureux des émissions de GES.

Sur cette base, une deuxième phase a été dédiée à la conception et au développement du système. L'architecture du système a été pensée de manière modulaire, intégrant des blocs distincts pour la gestion des données, les calculs d'émissions et la restitution des résultats. L'interface a été conçue afin de permettre une interaction simple et efficace avec l'utilisateur final.

La troisième phase a concerné l'implémentation du module de calcul. Compte tenu de l'absence d'accès automatisé aux bases de données telles que la Base Carbone de l'ADEME ou DEFRA, les facteurs d'émission ont été extraits manuellement depuis des sources fiables et insérés directement dans le code source. Ce choix, bien que limitant la mise à jour automatique des coefficients, permet une transparence totale sur les valeurs utilisées et une maîtrise complète de leur application dans les formules. Les conversions d'unités nécessaires ont également été implémentées pour garantir l'homogénéité des résultats en kilogrammes de CO₂ équivalent [14].

Enfin, une phase de validation a été conduite à l'aide de jeux de données simulés, calqués sur les activités réelles de Siemens Energy. L'objectif était de vérifier la robustesse du système, la cohérence des calculs, et l'intelligibilité des résultats générés. Les tests ont également porté sur l'ergonomie de l'interface et la pertinence des recommandations environnementales proposées en sortie.

Ce processus itératif s'inscrit dans une perspective de reproductibilité et d'ouverture : le système développé est conçu pour être facilement adapté à d'autres contextes industriels, notamment au sein de PME ou filiales opérant dans des environnements similaires. Il répond à une logique de digitalisation accessible de la comptabilité carbone, en accord avec les approches documentées récemment dans la littérature sur la transformation numérique durable [15].

1.7 Délimitation, périmètre et état d'avancement du système

Le système digitalisé développé dans le cadre de ce projet de fin d'études vise à outiller Siemens Energy pour l'évaluation de ses émissions de GES, conformément au référentiel du GHG Protocol. Toutefois, dans sa version actuelle, le système présente certaines limites inhérentes à l'état d'avancement du développement, au degré de digitalisation, ainsi qu'aux ressources disponibles pour l'automatisation complète.

1.7.1 Périmètre fonctionnel couvert

Le périmètre méthodologique retenu couvre l'ensemble des trois scopes définis par le GHG Protocol et sont pris en charge à travers une architecture modulaire, avec une attention particulière portée aux catégories les plus significatives pour Siemens Energy (ex. : combustion mobile, combustion stationnaire, transports, achats de biens et services, déplacements professionnels, déchets).

1.7.2 Délimitation technique

Le système repose sur une plateforme web semi-digitalisée, développée en Python (back-end) et utilisant une interface web permettant à l'utilisateur :

- de télécharger des modèles Excel préformatés pour la saisie des données.
- de soumettre ces fichiers via l'interface.
- d'obtenir des résultats d'émissions automatiquement calculés.

Cependant, certaines fonctionnalités ne sont pas encore automatisées :

- L'intégration des facteurs d'émission est manuelle, ce qui implique une intervention du développeur pour chaque catégorie.
- La génération des recommandations de réduction repose sur une interprétation humaine des résultats injectée dans le code.
- Certaines catégories nécessitent une lecture experte des données (ex. : émissions fugitives, déplacement domicile-travail des employés), ce qui limite la digitalisation complète.

1.7.3 État d'avancement du système

À la date de rédaction de ce rapport, le système atteint un niveau fonctionnel intermédiaire :

- La structure générale est opérationnelle pour les Scopes 1 et 2, avec des résultats calculés, consolidés et visualisables.
- 7 catégories sur les 15 du Scope 3 sont prises en charge.
- L'interface utilisateur est déployée en local, et permet une expérience fluide, bien qu'encore simplifiée en l'absence d'automatisation des imports dynamiques ou des mises à jour de coefficients.
- Des tests sur données réelles ont été effectués avec Siemens Energy, confirmant la robustesse des calculs et la pertinence des données extraites.
- Le système a été conçu de manière modulaire et répliquable permettant une extension future vers d'autres entités ou secteurs industriels.

Ce système constitue une base fonctionnelle solide, conforme aux principes du GHG Protocol, mais nécessitant des améliorations progressives en matière d'automatisation, d'intelligence intégrée et de connexion aux bases de données d'émission à jour.

1.8 Conclusion

Ce chapitre a posé les fondements du projet en présentant le contexte environnemental global, les enjeux pour les entreprises industrielles, ainsi que les ambitions de Siemens Energy en matière de neutralité carbone. Il a défini la problématique centrale du projet : concevoir un système digitalisé, conforme au GHG Protocol, pour évaluer les émissions de CO₂ équivalent et proposer des leviers de réduction adaptés.

Les objectifs du projet ont été structurés autour de la gestion des données, de l'automatisation des calculs, de la visualisation des résultats et de la formulation de recommandations. La méthodologie adoptée et l'état d'avancement du système ont enfin permis de situer les limites actuelles du prototype tout en ouvrant la voie aux développements présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Cadre Théorique et Technologique du Projet

2.1 Introduction

Ce chapitre vise à établir les fondements conceptuels, normatifs et technologiques sur lesquels repose le développement du système digitalisé d'évaluation des émissions de CO₂ équivalent. Dans un contexte où les enjeux climatiques imposent une transformation profonde des pratiques industrielles, la maîtrise des émissions de GES constitue un impératif stratégique et réglementaire pour les entreprises, en particulier dans les secteurs à forte intensité énergétique.

La première partie de ce chapitre revient sur les principes scientifiques relatifs aux GES : leur nature, leurs sources, leurs impacts climatiques, ainsi que les méthodes reconnues pour leur quantification. Elle met en lumière le rôle central du GHG Protocol comme cadre de référence international en détaillant la structuration en trois périmètres d'émissions (Scope 1, 2 et 3) et les 15 catégories associées au Scope 3.

Dans un second temps, le chapitre présente les typologies de leviers de réduction disponibles pour les organisations en s'appuyant sur les principales classifications retenues dans la littérature (fonction, nature, périmètre d'application), ainsi que sur les critères décisionnels mobilisés pour les hiérarchiser.

Enfin, une réflexion approfondie est menée sur l'apport de la digitalisation à la gestion environnementale en mettant l'accent sur les outils numériques actuellement disponibles, leurs limites, et le positionnement technologique envisagé pour la solution proposée. Cette analyse pose les bases nécessaires à la conception d'un système digitalisé, fiable et adapté aux spécificités des structures industrielles intermédiaires.

2.2 Les GES : définitions, sources et impacts

Les GES jouent un rôle central dans la compréhension des mécanismes climatiques à l'échelle planétaire. Toute méthodologie de comptabilité carbone s'appuie sur une connaissance précise de ces gaz, de leurs propriétés physiques, de leurs origines, ainsi que de leurs effets à court, moyen et long terme. Dans le cadre de ce projet, il est indispensable d'ancrer la conception du système digitalisé dans des fondements scientifiques solides, afin d'assurer la cohérence et la fiabilité des calculs.

Cette section se structure en plusieurs volets. Elle introduit d'abord la fonction des GES dans le bilan énergétique terrestre, avant d'identifier les principales molécules concernées par les régulations internationales. Elle distingue ensuite les sources naturelles et anthropiques d'émissions, pour enfin analyser les impacts mesurables de leur accumulation sur le système climatique global.

2.2.1 Définition et rôle dans l'équilibre climatique

Les GES sont des composés gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et réémettent une partie de cette énergie dans l'atmosphère. Ce phénomène contribue à maintenir une température moyenne terrestre stable, rendant possible l'existence d'un climat tempéré compatible avec la vie humaine [7].

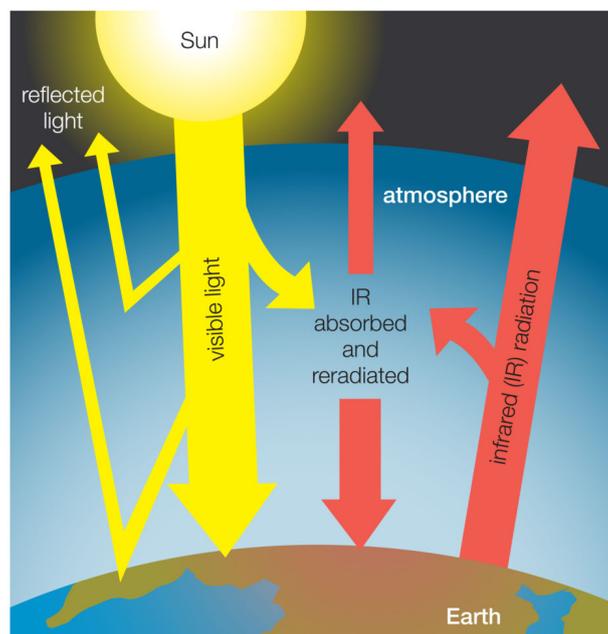


FIGURE 2.1 – Schéma illustrant le mécanisme de l'effet de serre [3]

En conditions naturelles, cet équilibre énergétique assure une température moyenne globale d'environ 15 °C. Toutefois, depuis la révolution industrielle, les activités humaines ont significativement accru la concentration atmosphérique de GES, amplifiant cet effet et induisant un forçage radiatif positif à l'échelle planétaire [1, 16].

Contrairement à des gaz à cycle court comme la vapeur d'eau, les principaux GES anthropiques tels que CO₂, CH₄, N₂O et les gaz fluorés possèdent une longue durée de vie dans l'atmosphère. Ils sont capables de piéger la chaleur de manière prolongée, contribuant à une accumulation énergétique dans la basse atmosphère. Leur contribution respective au réchauffement climatique est mesurée par le Potentiel de Réchauffement Global (PRG), un indicateur qui exprime l'effet cumulatif d'un gaz sur une période de 100 ans par rapport au CO₂ [9].

L'augmentation du forçage radiatif liée à ces gaz provoque une série de déséquilibres climatiques : élévation des températures moyennes, fonte des calottes glaciaires, montée du niveau des océans, perturbation des régimes de précipitation et fréquence accrue des événements extrêmes. Ces constats, largement documentés dans les rapports successifs du GIEC, justifient la mise en œuvre de politiques de réduction des émissions fondées sur des méthodologies robustes

et normalisées [7].

2.2.2 Principaux GES régulés

Les principaux GES faisant l'objet d'une régulation internationale sont au nombre de sept. Ils sont couverts par la quasi-totalité des cadres méthodologiques et inventaires nationaux, notamment dans le cadre du GHG Protocol [9]. Chaque gaz se distingue par son origine, sa durée de vie atmosphérique et son PRG.

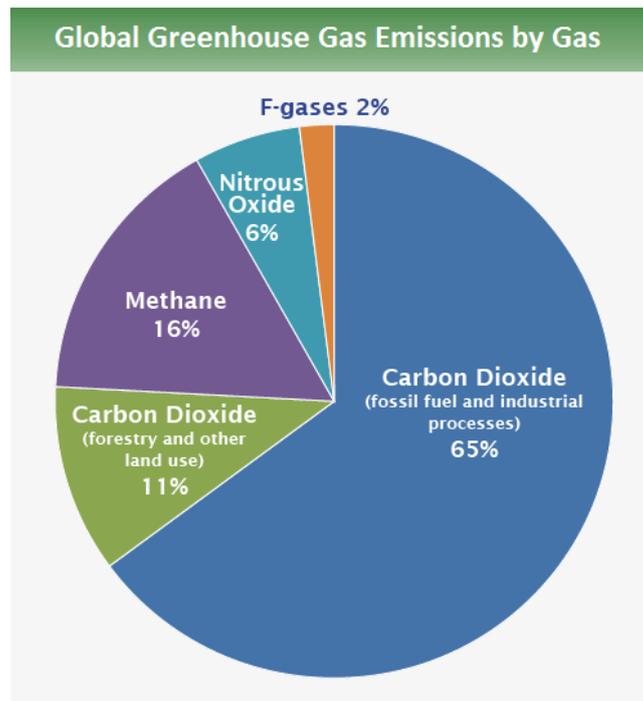


FIGURE 2.2 – Répartition mondiale des émissions de GES par gaz [4]

- **CO₂** : représente environ 74 % des émissions mondiales de GES. Il provient principalement de la combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), de la déforestation, de la fabrication de ciment, et d'autres procédés industriels [7, 17].
- **CH₄** : généré par les systèmes digestifs des ruminants, les rizières, la gestion des déchets organiques, ainsi que les fuites d'infrastructures gazières. Son PRG est environ 25 fois plus élevé que celui du CO₂ [7, 18].
- **N₂O** : émis principalement par l'usage d'engrais azotés et certains procédés industriels. Il possède un PRG d'environ 298 et est également impliqué dans la destruction de la couche d'ozone [7, 19].
- **Hydrofluorocarbures (HFC)** : utilisés dans les systèmes de réfrigération, climatisation et aérosols. Leur PRG varie de 124 à plus de 12 000 selon le composé. Bien qu'ils soient moins présents en volume, leur impact est considérable [9, 18].
- **Perfluorocarbures (PFC)** : utilisés dans l'électronique et l'industrie de l'aluminium. Ils présentent des PRG très élevés (jusqu'à 12 000) et une durée de vie atmosphérique pouvant dépasser 50 000 ans [18].
- **Hexafluorure de soufre (SF₆)** : employé comme isolant dans les équipements électriques haute tension. C'est l'un des GES les plus puissants, avec un PRG de 23 500 [19, 18].
- **Trifluorure d'azote (NF₃)** : utilisé dans la fabrication de panneaux solaires et de semi-conducteurs. Son PRG est estimé à environ 17 200 [18].

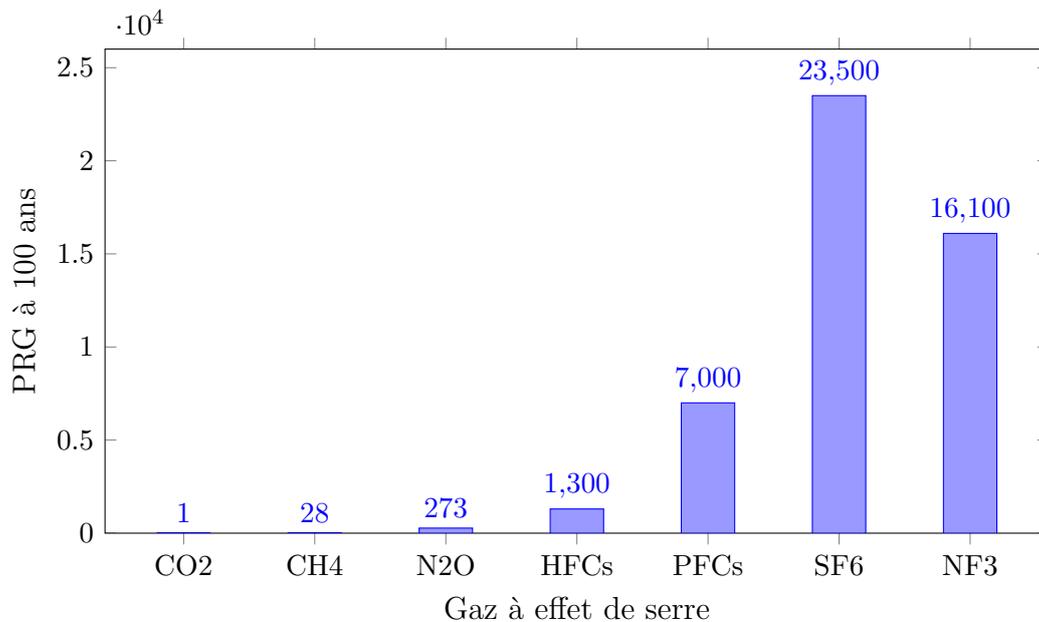


FIGURE 2.3 – Potentiels de réchauffement global (PRG) à 100 ans des principaux GES [5]

Ces gaz sont tous couverts par des accords internationaux tels que le Protocole de Kyoto et l'Accord de Paris. Ils constituent la base des inventaires carbone nationaux et des outils de quantification tels que ceux implémentés dans ce projet. Leur intégration dans les bilans repose sur une normalisation rigoureuse des facteurs d'émission, des unités et des périmètres analytiques.

2.2.3 Origines des émissions : naturelles et anthropiques

Les émissions de GES dans l'atmosphère proviennent à la fois de sources naturelles et d'activités humaines. Cette distinction est fondamentale dans l'analyse des inventaires carbone, car seule la portion anthropique est visée par les politiques de réduction et les obligations réglementaires [11].

Sources naturelles

Les GES sont présents dans l'atmosphère depuis des millions d'années. Le cycle naturel du carbone implique des échanges constants entre l'atmosphère, les océans, la biosphère et la lithosphère. Le CO₂ est émis naturellement par la respiration des êtres vivants, les feux de forêts spontanés, la décomposition de la matière organique et les éruptions volcaniques. Le CH₄ est également émis dans les zones humides (tourbières, marais) où la matière organique se dégrade en absence d'oxygène. Le N₂O résulte de processus microbiens dans les sols et les océans.

Ces émissions naturelles sont généralement équilibrées par des mécanismes d'absorption tels que la photosynthèse ou la dissolution dans les océans, ce qui maintient une relative stabilité du climat sur des échelles de temps longues.

Sources anthropiques

Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines ont fortement perturbé cet équilibre. La combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) pour la production d'énergie et les transports constitue la principale source de CO₂ [7]. L'agriculture intensive (ruminants, rizières), l'enfouissement de déchets organiques et les fuites de méthane issues des infrastructures fossiles sont responsables d'une part importante des émissions de CH₄. L'usage massif d'engrais azotés dans l'agriculture, ainsi que certains procédés industriels, augmentent les émissions de N₂O.

Enfin, l'industrie chimique, les systèmes de réfrigération et les équipements électriques introduisent des GES fluorés (HFC, PFC, SF₆) qui n'existent pas naturellement et dont le pouvoir de réchauffement est extrêmement élevé [19].

La compréhension de cette dualité entre émissions naturelles et anthropiques est essentielle pour établir un diagnostic climatique fiable, poser les bons périmètres d'analyse, et mettre en œuvre des stratégies d'atténuation fondées sur les causes réelles du déséquilibre.

2.2.4 Impacts sur le climat et les écosystèmes

L'accumulation de GES dans l'atmosphère entraîne une série de perturbations profondes du système climatique terrestre. Ce dérèglement touche non seulement la température globale moyenne, mais modifie également les cycles hydrologiques, les courants marins, la couverture neigeuse et la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes [7].

Depuis l'ère préindustrielle, la température moyenne mondiale a augmenté d'environ 1,1 °C. Ce réchauffement est directement lié à l'augmentation des concentrations de CO₂, CH₄ et N₂O dans l'atmosphère. Les modèles du GIEC indiquent que la poursuite des tendances actuelles pourrait mener à un dépassement du seuil critique de 1,5 °C dès les années 2030, avec des conséquences irréversibles à certaines échelles régionales [1, 7].

Parmi les effets documentés figurent :

- La fonte accélérée des glaciers et des calottes polaires, entraînant une élévation du niveau des mers.
- Une acidification progressive des océans, affectant les écosystèmes marins et la chaîne alimentaire.
- Des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses, augmentant les risques sanitaires et agricoles.
- Des périodes de sécheresse ou d'inondation extrêmes dans certaines régions, perturbant la sécurité alimentaire mondiale [20].
- Le déplacement et l'extinction d'espèces animales et végétales incapables de s'adapter à la vitesse des changements climatiques.

Les écosystèmes naturels, en plus d'être menacés, perdent aussi leur capacité de régulation : les forêts dégradées captent moins de CO₂, les zones humides émettent davantage de CH₄, et les océans, saturés en carbone, absorbent moins efficacement l'excès de CO₂. Ce phénomène crée des boucles de rétroaction positives, amplifiant encore le dérèglement climatique.

Ces impacts justifient l'urgence de quantifier et de réduire les émissions de GES à l'échelle des organisations et des territoires.

2.2.5 Évaluation des émissions : importance et enjeux

L'évaluation des émissions de GES constitue une étape stratégique dans toute démarche environnementale. Elle permet non seulement d'établir un diagnostic quantitatif de l'impact climatique d'une organisation, mais aussi de prioriser les actions à mener en matière de réduction et de compensation [9].

En absence de mesure rigoureuse, il est impossible d'engager une transition bas-carbone crédible. Les inventaires d'émissions permettent d'identifier les postes les plus émetteurs (par exemple : transport, énergie, achats, déchets) et de cibler les efforts de réduction sur les leviers les plus pertinents. Ils constituent également la base des rapports extra-financiers exigés par de nombreuses réglementations et normes internationales (Organisation internationale de normalisation (ISO) 14064, Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), GHG Protocol, etc.) [14].

Du point de vue économique, la quantification permet d'anticiper les risques liés à l'augmentation du coût carbone (taxe carbone, marché de quotas, restrictions d'accès à certains marchés). Du point de vue stratégique, elle favorise l'émergence de modèles d'affaires plus durables, basés sur l'efficacité énergétique, l'économie circulaire ou la décarbonation des chaînes d'approvisionnement [15].

Enfin, la traçabilité et la transparence des émissions constituent un levier de confiance vis-à-vis des parties prenantes (clients, investisseurs, autorités publiques), renforçant ainsi la réputation et la résilience de l'organisation.

2.3 Le GHG Protocol : cadre de référence méthodologique

Le GHG Protocol constitue le cadre méthodologique de référence à l'échelle internationale pour la quantification et la communication des émissions de GES, il propose une structuration rigoureuse des postes d'émission, en s'appuyant sur des principes comptables et des classifications normalisées [9].

Ce protocole distingue trois périmètres d'émissions : les émissions directes (Scope 1), les émissions indirectes liées à l'énergie (Scope 2), et les autres émissions indirectes réparties en quinze catégories (Scope 3). Chacun de ces périmètres fait l'objet de publications spécifiques qui détaillent les approches de calcul, les périmètres organisationnels, les facteurs d'émission, et les recommandations en matière de transparence [21].

Dans les sections suivantes, chaque scope sera présenté avec ses sous-catégories, ses enjeux méthodologiques, et les référentiels sur lesquels repose leur mise en œuvre dans le cadre du présent projet.

2.3.1 Présentation générale du GHG Protocol

Le GHG Protocol constitue la norme la plus utilisée à l'échelle internationale pour le reporting des émissions de GES des organisations. Lancé au début des années 2000 sous l'impulsion conjointe du World Resources Institute (WRI) et du World Business Council for Sustainable

Development (WBCSD), il vise à offrir un cadre méthodologique robuste, cohérent et transparent pour quantifier les émissions de GES selon des périmètres clairement définis [9].

La première édition du GHG Protocol s'est imposée rapidement comme la référence mondiale dans les secteurs public et privé. Elle a permis de normaliser les inventaires carbone, d'améliorer la comparabilité inter-entreprises et de préparer les organisations aux exigences réglementaires croissantes en matière de reporting extra-financier [21].

Le protocole distingue trois niveaux d'émissions (Scopes 1, 2 et 3), chacun structuré selon la nature des activités émettrices et le degré de contrôle de l'entité déclarante. À chaque scope correspond un guide spécifique, accompagné de principes comptables, de recommandations méthodologiques et de facteurs d'émission par défaut.

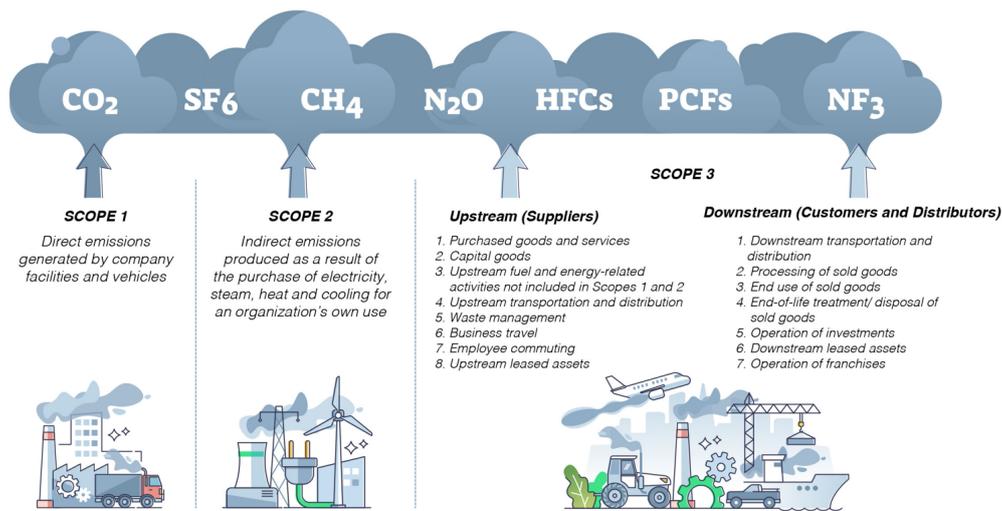


FIGURE 2.4 – Répartition des émissions du Scopes 1, 2 et 3 [6]

Le GHG Protocol constitue aujourd'hui le socle de nombreuses autres méthodologies internationales (comme la norme ISO 14064 ou la CSRD), et est à la base de plateformes de déclaration telles que le Carbon Disclosure Project (CDP), le Science Based Targets initiative (SBTi) ou encore la Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD).

Dans le cadre de ce projet, l'intégralité de la logique de catégorisation et de hiérarchisation du GHG Protocol a été reprise pour structurer le système de collecte, d'analyse et de calcul des émissions.

TABLE 2.1 – Comparaison des périmètres d'émissions du GHG Protocol

Scope	Définition	Exemples	Responsabilité
Scope 1	Émissions directes provenant des sources détenues ou contrôlées	Combustion stationnaire, véhicules d'entreprise, fuites de réfrigérant	Pleine responsabilité de l'entreprise
Scope 2	Émissions indirectes liées à l'énergie achetée (électricité, chaleur)	Électricité pour bureaux, vapeur achetée	Contrôle partiel (via contrat)
Scope 3	Toutes les autres émissions indirectes dans la chaîne de valeur (amont et aval)	Achats, transport, déchets, usage des produits, investissements	Responsabilité étendue, mais influencée indirectement

2.3.2 Scope 1 : Émissions directes

Le Scope 1 regroupe l'ensemble des émissions directes de GES issues des sources détenues ou contrôlées par l'organisation déclarante. Contrairement aux autres scopes, ces émissions proviennent d'activités internes à l'entité, qu'elles soient liées à la combustion d'énergie, à des procédés industriels ou à des fuites de substances.

Conformément au GHG Protocol, trois grandes catégories composent le Scope 1 : la combustion stationnaire (ex. chaudières fixes), la combustion mobile (véhicules et engins motorisés), et les émissions fugitives (fuites de fluides frigorigènes, de gaz SF₆, etc.) [9].

Chaque catégorie implique une méthode de calcul adaptée, fondée sur la connaissance précise des volumes d'énergie consommés, des équipements utilisés ou des fluides manipulés. La fiabilité des données est essentielle pour assurer la représentativité de l'inventaire carbone et éviter tout double comptage avec les autres scopes.

Les sections suivantes détaillent chacune de ces catégories selon les recommandations méthodologiques du GHG Protocol et de l'Environmental Protection Agency (EPA).

Combustion stationnaire

La combustion stationnaire correspond aux émissions de GES générées par l'utilisation de combustibles dans des équipements fixes tels que les chaudières, fours industriels, turbines, incinérateurs ou groupes électrogènes. Ces équipements sont généralement localisés sur des sites industriels ou tertiaires sous le contrôle de l'entité déclarante. Conformément au GHG Protocol, les émissions issues de ces installations relèvent du Scope 1 dès lors que l'organisation détient ou contrôle les sources fixes concernées [9].

Les combustibles les plus couramment utilisés dans les installations stationnaires incluent : le gaz naturel (principalement du méthane), les carburants (léger et lourd), le charbon, les gaz de pétrole liquéfiés (butane, propane) et la biomasse (bois, résidus organiques, pellets, etc.). Le choix du combustible influence fortement le volume d'émissions, en raison de la variabilité des pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) et des facteurs d'émission propres à chaque gaz (CO₂,

CH₄, N₂O).

L'EPA [22] propose une équation de base pour estimer les émissions de chaque GES à partir de la quantité de combustible utilisée :

$$\text{Émissions (kg GES)} = \text{Fuel} \times \text{EF1} \quad (2.1)$$

où :

- **Fuel** représente la masse (kg) ou le volume (litres ou m³) du combustible consommé,
- **EF1** est le facteur d'émission du GES concerné, exprimé en kg de GES par unité de combustible.

Une méthode plus complète prend en compte la quantité d'énergie produite à travers le PCI :

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{e)} = \text{Quantité de combustible} \times \text{PCI} \times \text{Facteur d'émission} \times \text{PRG} \quad (2.2)$$

où :

- **Quantité de combustible** : masse ou volume consommé (ex. litres, kg),
- **PCI** : pouvoir calorifique inférieur (exprimé en GJ par unité de combustible),
- **Facteur d'émission** : quantité de GES émise par GJ (en kg GES/GJ),
- **PRG** : potentiel de réchauffement global du gaz (ex. 1 pour le CO₂, 28 pour le CH₄, 265 pour le N₂O selon le GIEC).

Lorsque les données techniques du combustible sont disponibles, une approche plus analytique basée sur la teneur en carbone peut être utilisée :

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{)} = \text{Masse de combustible} \times \text{Fraction de carbone} \times \text{Taux d'oxydation} \times \frac{44}{12} \quad (2.3)$$

où :

- **Fraction de carbone** : pourcentage massique de carbone contenu dans le combustible,
- **Taux d'oxydation** : taux de conversion du carbone en CO₂ pendant la combustion (généralement estimé entre 0,98 et 1),
- **44/12** : facteur de conversion stœchiométrique entre le carbone (C) et le dioxyde de carbone (CO₂).

Enfin, certaines grandes installations industrielles utilisent des instruments de mesure en continu (CEMS) qui enregistrent directement les concentrations de GES dans les fumées (en ppm ou mg/Nm³), ce qui permet une quantification précise mais coûteuse.

Les facteurs d'émission varient selon le type de combustible. À titre d'exemple, pour le gaz naturel [22] :

- CO₂ : 53,06 kg/MMBtu,
- CH₄ : 0,001 kg/MMBtu,
- N₂O : 0,0001 kg/MMBtu.

Des tables similaires existent pour tous les combustibles standards (charbon, carburant, GPL, biomasse).

L'unité d'énergie de référence utilisée par l'EPA est le MMBtu (million British thermal units), mais il est recommandé d'exprimer les consommations en GJ (gigajoules) dans les rapports normalisés. La cohérence des unités est essentielle pour garantir la fiabilité des résultats.

Lorsqu'un combustible est d'origine biogénique (ex. bois, biogaz), les émissions de CO₂ doivent être reportées séparément en tant qu'émissions biogéniques, conformément aux recommandations du GHG Protocol. En revanche, les émissions de CH₄ et de N₂O issues de la combustion de biomasse doivent être intégrées dans le Scope 1.

Pour améliorer la précision de l'inventaire, il est fortement recommandé de séparer les émissions par type de combustible, par équipement et par site. Cela permet de mieux cibler les postes émetteurs et d'envisager des actions de réduction pertinentes. Il convient également de documenter rigoureusement les sources de données (factures, relevés de jauges, rapports de maintenance, certificats fournisseurs).

Combustion mobile

La combustion mobile couvre les émissions de GES issues de la combustion de carburant dans des véhicules, engins ou machines mobiles possédés ou contrôlés par l'organisation. On y retrouve notamment :

- les véhicules légers de service (voitures, utilitaires).
- les véhicules lourds (camions, autocars, équipements de logistique).
- les engins de chantier et équipements hors route (bulldozers, pelles, générateurs mobiles).
- les dispositifs spécialisés (locomotives, bateaux de service, etc.).

Cette catégorie est essentielle dans les secteurs comportant une flotte interne ou des opérations logistiques. Les données disponibles déterminent la méthode de calcul la plus pertinente, conformément à l'EPA (2016) [23].

L'EPA propose cinq formules adaptées selon le type de données :

$$\text{Émissions} = \text{Fuel} \times \text{EF1} \quad (2.4)$$

- Fuel : quantité de carburant (volume ou masse).
- EF1 : facteur d'émission en kg GES/unité de carburant.

$$\text{Émissions} = \text{Fuel} \times \text{HHV} \times \text{EF2} \quad (2.5)$$

- HHV : pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg ou BTU/gallon).
- EF2 : facteur d'émission par unité d'énergie (kg GES/MJ ou kg/BTU).

$$\text{Émissions} = \text{Fuel} \times \text{CC} \times \frac{44}{12} \quad (2.6)$$

- CC : teneur en carbone (gC/unité), valable uniquement pour le CO₂.

$$\text{Émissions} = \text{Distance} \times \text{EF4} \quad (2.7)$$

- Distance : kilomètres ou miles parcourus.
- EF4 : facteur d'émission par distance (kg GES/km ou kg/mile).

$$\text{Émissions} = \text{Fuel} \times \text{EF5} \quad (2.8)$$

- Fuel : carburant consommé.
- EF5 : facteur d'émission spécifique aux équipements non routiers.

Les facteurs d'émission standards pour le diesel (EPA) sont :

- CO₂ : 10,21 kg/gallon US.
- CH₄ : 0,0005 kg/gallon US.
- N₂O : 0,0001 kg/gallon US.

Les carburants pris en compte incluent l'essence, le diesel, le GNC, le GPL et les biocarburants. Pour les carburants d'origine biogénique, les émissions de CO₂ doivent être traitées séparément selon les recommandations du GHG Protocol.

Les enjeux liés à cette catégorie comprennent :

- Dépendance au carburant routier, directement liée aux distances parcourues.
- Part importante des flottes internes ou externalisées dans les émissions totales.
- Difficulté à collecter des données précises en l'absence de télémétrie ou de facturation détaillée.
- Influence des conditions d'utilisation (terrain, charge, conduite) sur les émissions réelles.

Le CO₂ constitue la majorité des émissions, mais le CH₄ et le N₂O doivent être pris en compte à cause de leur PRG élevé (28 et 265). L'ensemble est converti en CO₂e pour le bilan consolidé.

Il est fortement recommandé de séparer les émissions par :

- Type de carburant.
- Usage (routier / hors route).
- Flotte ou site géographique.

Cela permet de cibler des mesures pertinentes (motorisation alternative, maintenance, conduite économe). La cohérence des unités et la documentation des sources (factures, systèmes embarqués) sont essentielles pour garantir la traçabilité et la crédibilité du bilan.

Émissions fugitives

Les émissions fugitives désignent les rejets involontaires de GES (F-GES) issus d'équipements, réservoirs, réseaux de fluides ou procédés industriels contrôlés par l'organisation. Elles relèvent du Scope 1 car issues de sources détenues ou exploitées, même hors combustion [24].

Il existe principalement trois méthodes recommandées pour estimer ces émissions :

$$\text{Émissions} = (\text{PN} - \text{CN}) + \text{PS} + (\text{CD} - \text{RD}) \quad (2.9)$$

où :

- **PN** : quantité de réfrigérant achetée pour nouveaux équipements.
- **CN** : capacité totale de ces équipements.
- **PS** : quantité achetée pour la maintenance (fuites opérationnelles).
- **CD** : capacité totale de réfrigérant dans les équipements retirés.
- **RD** : quantité récupérée au moment du retrait.

$$\text{Émissions} = \text{Nombre d'équipements} \times \text{Capacité} \times (K + X) \quad (2.10)$$

Approche de dépistage (screening, Tier 2 IPCC) :

- **K** : taux d'émission à l'installation (% de capacité).
- **X** : taux de fuite annuel (%).

$$\text{Émissions} = \text{Nombre d'équipements} \times \text{Capacité} \times (1 - Y) \times (1 - Z) \quad (2.11)$$

Approche par bilan matériel ou dépense d'évacuation :

- **Y** : pourcentage restant à la fin de vie.
- **Z** : efficacité de récupération (avant mise au rebut).

Ces méthodes s'appliquent de manière distincte en fonction des équipements concernés :

- Réfrigérants / fluides frigorigènes (HFC, CFC) : Equation (1) ou (3) à prioriser, avec conversion en éq. CO₂ via le PRG (souvent très élevé).
- Gaz SF₆ dans les installations haute tension : même principe, mais le PRG peut dépasser 23500.
- Méthane (CH₄) : utilisé dans les installations pétrolières ou gazières, les fuites de puits ou pipelines requièrent des facteurs spécifiques.
- Fuites de vapeurs ou vapeur de solvants industriels : utilisant des facteurs par équipements ou site.
- Poussières fugitives (mines, stockages) : bien qu'ils n'appartiennent pas strictement aux GES, leur méthode équivalente tient compte des émissions particulières par facteurs (hors cadre GHG).

Les enjeux principaux sont :

- Difficulté de quantification des rejets ponctuels ou intermittents,
- Importance des taux de fuite, maintenance et récupération,
- Diversité des gaz concernés (réfrigérants, SF₆, CH₄),
- PRG variable selon le gaz, impactant fortement l'équivalent CO₂,
- Nécessité de log d'intervention, récupération, maintenance.

Pour une évaluation complète, il est recommandé de :

- Combiner plusieurs méthodes selon la criticité des installations.
- Appliquer des pratiques de monitoring (fuites, maintenance) et de traçabilité des fluides.
- Exprimer les résultats en équivalent CO₂, en utilisant les PRG du GIEC.
- Appliquer une ventilation par type d'équipement, gaz, site.

2.3.3 Scope 2 : Émissions indirectes liées à l'énergie

Les émissions de GES du Scope 2 représentent les émissions indirectes liées à l'énergie achetée par l'organisation, notamment l'électricité, la chaleur, la vapeur ou le refroidissement, dont la production émet des GES en dehors du périmètre opérationnel, mais qui sont attribuées à la consommation de l'entité déclarante [25].

Les fondements du reporting Scope 2 reposent sur une approche duale :

- la méthode **location-based** (LB) : utilisation d'un facteur d'émission moyen basé sur la production d'énergie du réseau électrique local.
- la méthode **market-based** (MB) : prise en compte des facteurs contractuels via des instruments comme les certificats d'énergie renouvelable (Garantie d'Origine, PPA, etc.), en suivant les critères de qualité du Scope 2 Guidance [25].

Les émissions sont calculées selon les formules suivantes :

$$\text{Émissions}_{\text{LB}} = \text{Consommation (kWh)} \times \text{FE}_{\text{LB}} \quad (2.12)$$

$$\text{Émissions}_{\text{MB}} = \text{Consommation (kWh)} \times \text{FE}_{\text{MB}} \quad (2.13)$$

où :

- **Consommation (kWh)** : quantité d'énergie achetée (électricité, chaleur, vapeur, refroidissement).
- **FE_{LB}** : facteur d'émission moyen du réseau local.
- **FE_{MB}** : facteur contractuel issu d'un certificat ou contrat répondant aux critères de qualité (même zone, instrument traçable, période alignée, etc.) [25].

Le Scope 2 Guidance (2023) détaille une hiérarchie de sources validées pour les données MB (certificats, PPA, factures) et impose la publication des deux calculs (LB et MB) pour assurer transparence et comparabilité.

Spécificités et enjeux du Scope 2 :

- **Responsabilité indirecte** : les émissions ne se déroulent pas sur site, mais sont rattachées à la consommation réelle de l'entreprise.
- **Dualité LB vs MB** : la méthode LB reflète l'empreinte moyenne du réseau, la MB valorise les choix bas-carbone volontaires.
- **Comparabilité** : assure une lecture cohérente entre sites ayant des mixes énergétiques différents et permet la comparaison avec d'autres entreprises.
- **Impacts commerciaux et réputationnels** : la méthode MB permet de valoriser l'usage d'énergie verte et de renforcer la crédibilité environnementale.
- **Précision réglementaire** : les calculs doivent se baser sur des données vérifiables selon huit critères (ex. facturation, origine, zone géographique, période) [25].
- **Inclusion d'autres vecteurs** : pour la chaleur, la vapeur et le refroidissement, des FE spécifiques s'appliquent en fonction du réseau (chauffage urbain, modules à absorber, etc.).
- **Traitement des émissions biogéniques** : si la chaleur provient de biomasse, les émissions de CO₂ doivent être distinguées (biogéniques vs fossiles) selon le protocole.

Bonnes pratiques associées :

- Utiliser la méthode LB pour la comparabilité institutionnelle et la MB pour valoriser l'énergie verte contractuelle.
- Employer des données certifiées (certificats, PPA) pour la partie MB, en priorisant les sources vérifiables.
- Séparer les consommations et émissions par type d'énergie (électricité, chaleur, vapeur, refroidissement).
- Publier clairement les deux valeurs LB et MB avec les valeurs de FE associées.
- Documenter les éléments contractuels : zone géographique, période alignée, instrument utilisé, fournisseur.

2.3.4 Scope 3 : Émissions indirectes liées à la chaîne de valeur

Le Scope 3 désigne l'ensemble des émissions indirectes qui ne sont pas incluses dans le Scope 1 ni dans le Scope 2, mais qui sont générées à toutes les étapes de la chaîne de valeur d'une entreprise, en amont comme en aval. Ces émissions proviennent d'activités que l'organisation ne contrôle pas directement, mais sur lesquelles elle exerce une influence économique réelle [26, 27].

Dans de nombreux secteurs, les émissions du Scope 3 représentent la part la plus importante du total des émissions de GES. Leur intégration permet :

- d'identifier les principaux postes indirects à fort impact carbone.
- d'élargir la stratégie de décarbonation aux fournisseurs, clients, partenaires et sous-traitants.
- de répondre aux exigences réglementaires croissantes en matière de transparence (CSRD, SBTi, CDP, etc.).

Le GHG Protocol divise les émissions du Scope 3 en 15 catégories normalisées réparties en deux grands blocs :

- **Amont** (catégories 1 à 8) : portant sur les flux entrants (achats, transports, énergie, déchets, biens loués, etc.).
- **Aval** (catégories 9 à 15) : concernant l'aval de l'activité (distribution, usage, fin de vie des produits, franchises, investissements, etc.).

Chaque organisation doit déterminer quelles catégories sont pertinentes à comptabiliser, en fonction de son secteur d'activité, de son modèle économique, de sa chaîne logistique et de sa capacité d'accès aux données.

La qualité de l'inventaire dépend fortement :

- de la méthode de calcul retenue (dépenses, activité, hybride).
- de la granularité et fiabilité des données collectées (factures, données fournisseurs, enquêtes, etc.).
- de la documentation et de la justification des hypothèses utilisées.

Les 15 catégories utilisées dans ce rapport sont désignées comme suit :

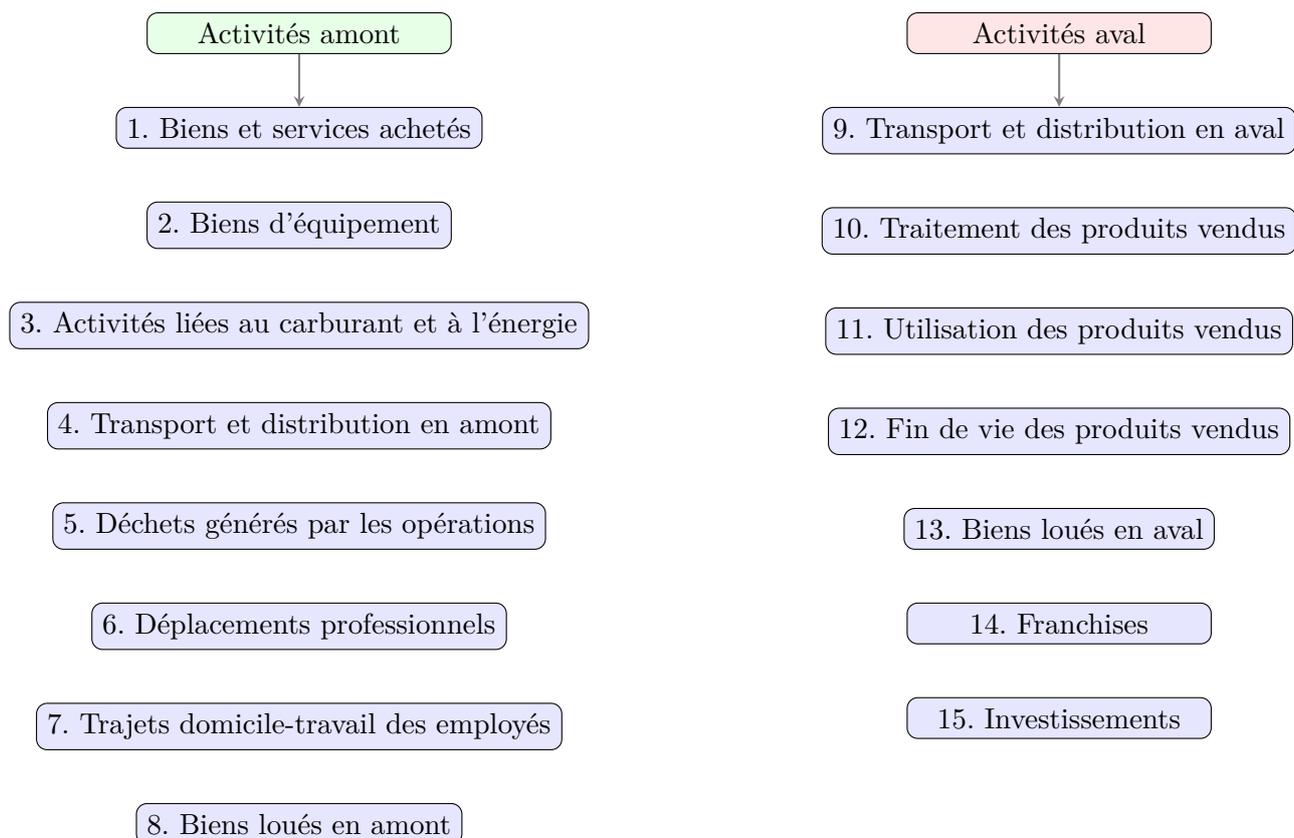


FIGURE 2.5 – Catégorisation des émissions du Scope 3 selon le GHG Protocol en amont et en aval

Chacune de ces catégories sera développée dans les sections suivantes, en décrivant leur périmètre, les méthodes de calcul recommandées par le GHG Protocol, ainsi que les données typiques à collecter.

Catégorie 1 : Biens et services achetés

Cette catégorie englobe l'ensemble des émissions associées à la production en amont des biens et services achetés par l'organisation durant l'année de référence, avant même leur réception (principe cradle-to-gate) [26]. Elle inclut :

- les matières premières et composants (métaux, plastiques, textiles, etc.).
- les services externalisés (maintenance, conseil, nettoyage, IT, etc.) .
- les achats indirects (mobilier, consommables, fournitures de bureau, logiciels, etc.).

Les méthodes de calcul selon le Scope 3 Calculation Guidance (2023) sont classées par ordre de précision :

- **Supplier-specific** : données d'émission directement fournies par le fournisseur.
- **Hybrid** : mix de données spécifiques et moyennes pour combler les lacunes.
- **Average-data** : quantité physique multipliée par un facteur sectoriel moyen.
- **Spend-based** : montant monétaire multiplié par un facteur dérivé de bases Environmentally Extended Input-Output (EEIO).

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{produit},i}) \quad (2.14)$$

Formule recommandée en méthodes supplier-specific et hybrid, où chaque produit/service i est associé à un facteur d'émission spécifique.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_s) \quad (2.15)$$

Formule spend-based, utile pour obtenir une estimation rapide lorsque seules les données financières sont disponibles.

Les informations nécessaires comprennent :

- la quantité physique des biens achetés (en kg, m³, heures).
- les montants financiers dépensés par poste.
- les facteurs d'émission (fournisseur, base moyenne, EEIO).
- le contexte d'origine (zone géographique, processus de production).

Points importants et bonnes pratiques :

- cette catégorie est souvent un poste d'émissions majeur, surtout pour les activités industrielles ou manufacturières.
- les méthodes supplier-specific et hybrid offrent des données plus robustes mais nécessitent un effort de collecte.
- la méthode spend-based, bien que moins précise, permet d'engager un processus d'amélioration des données.
- privilégier les bases certifiées (WRI, ADEME, EPA) pour les facteurs EEIO.
- mettre en place une hiérarchisation des méthodes selon la criticité des achats (ex. matières premières vs fournitures).
- mesurer les incertitudes (bandes de confiance, sensibilités) pour renforcer la qualité du reporting.
- prévoir des cycles d'amélioration continue : dialogues fournisseurs, demandes de données plus fines, audits ciblés.
- documenter les hypothèses, transformations (unités, conversion), et les versions des bases utilisées.

Catégorie 2 : Biens d'équipements

Cette catégorie concerne les émissions associées à la fabrication, au transport, à l'installation et à la mise en service d'équipements durables utilisés par l'organisation (machines-outils, serveurs, véhicules d'entreprise, mobilier technique, etc.) jusqu'au début de leur usage (cradle-to-gate) [26].

Méthodes de calcul :

- **Supplier-specific** : recueil des données d'émissions par fournisseur, par référence produit et par processus de production.
- **Hybrid** : données partielles spécifiques complétées par facteurs sectoriels pour couvrir les éléments manquants.
- **Average-data** : multiplication des quantités physiques (nombre, poids, puissance) par facteurs moyens sectoriels (kg CO₂e/kg, kg CO₂e/kW).
- **Spend-based** : montant d'achat (hors TVA) multiplié par un facteur économique typique (kg CO₂e/€), en dernier recours.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{équipement},i}) \quad (2.16)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_s) \quad (2.17)$$

Informations clés à collecter :

- référence et spécifications du bien (modèle, poids, puissance, matériau).
- volume de production ou nombre d'unités.
- origine géographique (site usine) et mode de distribution (transport routier, maritime, etc.).
- quantité et impact carbone de l'installation (consommables, durée de mise en service).
- prix d'achat unitaire pour contexte économique.

Points d'attention :

- Les équipements complexes (serveurs, machines industrielles) impliquent souvent des processus énergivores (fonderies, usinage, assemblage) et une diversité de matériaux à fort impact (alliages, plastiques, circuit imprimé).
- La coopération fournisseur (via fiches environnementales ou déclarations produits Éco-profil de déclaration de conformité (EPdC) / Product Environmental Footprint (PEF)) permet d'accéder à des données précises, notamment GWP des composants clés.
- L'option dictée par la durée de vie : répartir les émissions sur la période d'utilisation grâce à une allocation annuelle (ex. amortissement linéaire).
- L'actualisation des facteurs FE est primordiale pour refléter les progrès techniques (ex. électricité verte, aluminium recyclé).
- Prendre en compte l'obsolescence rapide (technologies IT, serveurs) qui peut amplifier la valeur d'émission annuelle par unité utilisée.
- Dans le cas d'équipements revalorisés ou reconditionnés, appliquer les principes de circularité (éviter la double comptabilisation).

Catégorie 3 : Activités liées au carburant et à l'énergie (non incluses dans le Scope 1 ou 2)

Cette catégorie couvre les émissions indirectes associées à l'achat et à la revente de carburant ou d'énergie par l'organisation, sans qu'ils aient été consommés directement sur ses sites (ex. carburant fourni à des sous-traitants, bornes de recharge, services énergétiques). Elle inclut également les émissions liées à la production des carburants ou énergies achetées puis transférées [26].

Cela englobe :

- le carburant livré à des tiers (véhicules sous-traités, engins loués, etc.).
- l'énergie achetée (kWh, MWh) mais qui est redistribuée (bornes publiques ou aux partenaires).
- les activités de trading énergétique où l'organisation achète/ revend ces flux.

Méthodes de calcul recommandées :

- **Activity-based** : utilisation de données volumétriques précises (litres, kWh) pointant vers un facteur d'émission approprié.
- **Spend-based** : montant dépensé multiplié par un facteur monétaire standard, lorsque seules les données financières sont disponibles.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_i) \quad (2.18)$$

Méthode activity-based privilégiée pour sa précision, après vérification des unités et de la conversion si besoin.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_\$) \quad (2.19)$$

Méthode spend-based utilisée à défaut de données physiques, avec adaptation aux conditions monétaires locales.

Données à collecter :

- quantités de carburant/énergie transférées, avec leur unité précise (L, kWh, MJ, etc.).
- facture ou document contractuel indiquant l'usage final ou le destinataire.
- facteur d'émission adapté au type d'énergie, selon EPA ou sources nationales.
- destination : sous-traitant, activité externalisée, lieu géographique.
- date de livraison et durée de l'usage/exploitation.

Enjeux spécifiques :

- **Double comptage** : éviter que le nouveau consommateur ne comptabilise à nouveau ces émissions dans son propre Scope 1.
- **Suivi des flux partagés** : notamment énergétique (bornes électriques, réseaux partagés).
- **Uniformité des facteurs** : utiliser la même base d'émission que pour l'activité propre, pour garantir la comparabilité.
- **Traçabilité** : contrats clairs avec détails sur les volumes transférés et usage final.
- **Objectif de transition** : distinguer les carburants conventionnels des alternatives basses émissions (biocarburants, électricité verte) pour valoriser les choix bas carbone.
- **Suivi des évolutions contractuelles** : prises en compte des changements de structure (nouveaux partenaires, modifications de volume) dans les cycles de reporting annuels.

- **Contrôles qualité** : audits physique ou télémétriques, rapprochement factures / relevés de compteur, relevés journaliers.

Bonnes pratiques :

- viser l'activity-based à mesure que les systèmes (Bornes, relevés télématiques) sont déployés.
- documenter et archiver les contrats ou bordereaux de livraison.
- tenir à jour un registre des volumes transférés et actualiser les FE chaque année.

Catégorie 4 : Transport et distribution en amont

Cette catégorie couvre les émissions liées au transport des biens et de matières premières depuis les fournisseurs jusqu'aux sites de l'organisation (usine, entrepôt, dépôt), incluant toutes les étapes logistiques amont [26].

Les modes de transport concernés sont :

- le transport routier (camions légers, poids lourds).
- le transport maritime (chargement de conteneurs, navigation).
- le transport ferroviaire.
- le transport aérien (colis urgents, pièces critiques).
- les transits intermodaux (maritime + route, rail + route).

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : multiplier la distance (km) par la quantité transportée (tonnes ou TEU) et le facteur d'émission correspondant au mode.
- **Spend-based** : montant logistique multiplié par un facteur économique.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Distance}_i \times \text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{mode},i}) \quad (2.20)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.21)$$

Données à collecter :

- poids ou volume des marchandises.
- distances parcourues par mode.
- mode de transport utilisé.
- facteurs d'émission spécifiques (kg CO₂e/tonne.km ou TEU.km).
- coûts logistiques associés (transport, douane, manutention).

Enjeux et bonnes pratiques :

- Le transport amont représente souvent un pourcentage significatif du Scope 3, en particulier pour les biens volumineux ou importés.
- Les facteurs varient selon le mode de transport, le type de carburant et le taux de remplissage du véhicule.
- Privilégier les données réelles du transporteur (relevés EDI, Fret impact) plutôt que des moyennes sectorielles.
- Séparer par fournisseur et itinéraire pour identifier les trajets les plus émissifs.
- Utiliser des bases de données validées (ADEME, DEFRA, Global Logistics Emissions Council (GLEC)) pour obtenir des FE fiables.

- Dans les schémas intermodaux, appliquer la méthode multi-tranche (ex. 50 % maritime + 50 % routier).
- Documenter la fréquence des transports, les tailles de lots et la variation saisonnière.
- En optant pour des transports plus durables (rail, maritime éco-conçu, carburants alternatifs), l'entreprise peut réduire considérablement son empreinte amont.

Catégorie 5 : Déchets générés par les opérations

Cette catégorie intègre toutes les émissions indirectes associées à la gestion des déchets produits par l'entreprise dans le cadre de ses activités quotidiennes. Production, bureaux, maintenance, chantiers, laboratoires, etc. Elle couvre l'ensemble du cycle depuis la génération sur site jusqu'à son traitement final (gate-to-grave) [26].

Les types de déchets concernés sont variés : papier/carton, plastiques, métaux, verre, bois, déchets dangereux (huiles, solvants), boues, résidus alimentaires, déchets électroniques ou issus de chantiers. La composition et la destination (recyclage, incinération, mise en décharge, compostage) influencent fortement l'intensité carbone.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : masse ou volume généré par type de déchet multiplié par un facteur spécifique au traitement.
- **Spend-based** : montant facturé au prestataire multiplié par un facteur économique (kg CO₂e/€).
- **Average-data** : application de facteurs moyens sectoriels lorsque les données précises ne sont pas disponibles.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{traitement},i}) \quad (2.22)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\text{§}}) \quad (2.23)$$

Données indispensables à collecter :

- classification précise des déchets (codes ADEME/NACE),
- quantités (kg ou m³), idéalement enregistrées par flux et source opérationnelle,
- filière de traitement : recyclage, incinération, méthanisation, mise en décharge, etc.
- type d'installation (local interne ou externe), distance parcourue et mode de transport.
- données contractuelles : tonnage fondé, fréquence et conditions de ramassage.

Spécificités et impact carbone :

- L'incinération émet du CO₂ fossile, avec des émissions parfois compensées par la récupération d'énergie.
- La mise en décharge génère du CH₄ (fort PRG) lié à la dégradation organique.
- Le recyclage offre un gain carbone net en évitant la production primaire de matériaux.
- Les déchets dangereux nécessitent des filières spécialisées, potentiellement énergivores et fortement réglementées.
- Les déchets organiques (restes alimentaires, résidus de biomasse) peuvent être valorisés par compostage ou digesteurs avec ou sans capture du CH₄.
- Les flux électroniques (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE)) combinent recyclage, traitement des composants toxiques et réemploi.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Séparer les émissions par type de traitement pour cibler les leviers : tri, réduction, recyclage local vs exportation.
- Mettre en place un système de collecte granulaire (bennes par flux, suivi mensuel avec pesées).
- Choisir des prestataires ayant des bilans carbone ou certifications ISO 14001/EMAS.
- Élaborer une stratégie de réduction à la source (réemploi, recyclage, réduction des mises en décharge).
- Calculer les émissions évitées par les voies circulaires, avec méthodologies normalisées (ADEME, WRAP).
- Actualiser les FE, notamment pour les décharges dont les émissions de méthane varient selon l'âge et la composition des déchets.

Catégorie 6 : Déplacements professionnels

Cette catégorie regroupe les émissions liées aux déplacements des employés dans le cadre de l'activité professionnelle (missions, réunions, visites, déplacements inter-sites), y compris les déplacements en avion, train, voiture de service, taxi, ou véhicule privé utilisé à des fins professionnelles [26].

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** (données privilégiées) : nombre de trajets ou distance parcourue par mode de transport multipliée par un facteur d'émission (kg CO₂e/km ou par passager-km).
- **Hybrid** : cas où certaines données manquent, on applique des moyennes sectorielles à des données partielles.
- **Spend-based** (à éviter) : montants dépensés (billets, indemnités kilométriques) multipliés par un facteur économique.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Distance}_i \times \text{FE}_{\text{mode},i}) \quad (2.24)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.25)$$

Données à recueillir :

- mode de transport utilisé (avion, train, voiture de service, taxi, Véhicule de Transport avec Chauffeur (VTC), véhicule personnel).
- distances ou durée des trajets (km ou passager-km).
- nombre de voyageurs et taux de remplissage.
- classe de voyage (économie, affaires) pour les vols.
- date, motif professionnel et lieu de départ/arrivée.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Les émissions des vols long-courriers sont particulièrement élevées en raison du PRG élevé des émissions de CO₂ et des autres GES.
- L'empreinte liée aux voitures de service dépend du type de carburant utilisé et de l'efficacité (essence, diesel, hybride, électrique).

- Inciter aux transports moins émissifs (train ou covoiturage) et privilégier les visioconférences pour réduire le besoin de déplacement.
- Appliquer des taux de remplissage moyens pour l'estimation des émissions par passager.
- Mettre en place un système de collecte des justificatifs (billets, factures, rapports de mission).
- Préconiser des outils internes (géolocalisation, plateformes de réservation) intégrant les émissions calculées.
- Sensibiliser les employés à l'impact carbone de leurs choix de déplacement.

Catégorie 7 : Trajets domicile-travail des employés

Cette catégorie couvre les émissions générées par les déplacements quotidiens des employés entre leur domicile et leur lieu de travail. Ces déplacements, bien que hors du contrôle direct de l'entreprise, relèvent de sa chaîne de valeur amont et constituent un poste d'émissions significatif, notamment pour les structures à fort effectif ou en zone périurbaine [26].

Les moyens de transport concernés sont :

- véhicules personnels (essence, diesel, hybride, électrique).
- transports en commun (bus, métro, tram, train).
- deux-roues motorisés ou non.
- covoiturage, navettes d'entreprise, marche à pied.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : multiplication de la distance domicile-travail par le nombre de trajets annuels et le facteur d'émission propre au mode de transport.
- **Spend-based** : utilisé en l'absence de données, via les indemnités transport ou abonnements.
- **Enquête employé** : méthode hybride fondée sur un questionnaire renseignant les habitudes de déplacement.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Distance}_i \times \text{Trajets}_i \times \text{FE}_{\text{mode},i}) \quad (2.26)$$

Données à collecter :

- adresse approximative des employés ou distance moyenne parcourue.
- nombre de jours travaillés sur site dans l'année (télétravail exclu).
- mode(s) de transport utilisé(s).
- taux d'occupation ou de remplissage (si applicable).
- données issues d'enquêtes RH ou de plateformes de mobilité.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie est sensible aux politiques de mobilité mises en place (navettes, télétravail, prime vélo, etc.).
- Elle permet d'orienter des actions de réduction concrètes, avec un fort impact social (meilleure qualité de vie au travail).
- Il est recommandé de réaliser une enquête mobilité anonyme auprès des salariés afin d'identifier les usages réels.
- La segmentation par mode permet de cibler les leviers (ex. subvention transports en commun, parkings vélos).

- Les facteurs d'émission varient selon la motorisation, l'occupation du véhicule et la fréquence des trajets.
- Les émissions évitées par le télétravail peuvent aussi être valorisées.

Catégorie 8 : Biens loués en amont

Cette catégorie couvre les émissions indirectes associées à l'utilisation par l'organisation de biens loués à des tiers **sans qu'elle en soit propriétaire** lorsque les émissions directes associées sont comptabilisées dans le Scope 1 ou 2 du bailleur (le propriétaire). Cela concerne par exemple les bâtiments loués, les équipements de chantier, les machines, les flottes de véhicules ou les serveurs informatiques [26].

Cette catégorie s'applique lorsque l'organisation est locataire et que le contrat de location est opéré en dehors de son périmètre organisationnel comptabilisé en Scope 1 ou 2. Cela dépend du mode de contrôle opérationnel ou financier choisi.

Exemples de biens concernés :

- bureaux et bâtiments loués (énergie, chauffage non maîtrisé par l'entreprise).
- véhicules loués à court ou long terme.
- équipements informatiques en leasing (serveurs, imprimantes, routeurs).
- machines industrielles temporaires, grues, générateurs.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : consommation d'énergie (kWh, carburant, etc.) liée au bien multipliée par un facteur d'émission standard.
- **Spend-based** : montant des loyers/factures multiplié par un facteur économique.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Consommation}_i \times \text{FE}_i) \quad (2.27)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.28)$$

Données à recueillir :

- liste des biens loués et durée d'utilisation.
- facture d'énergie, carburant, ou estimation basée sur la puissance/usage.
- superficie des bâtiments loués (pour extrapolation via ratios m²).
- factures de location, contrats de leasing.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie permet de rendre compte des émissions d'usage d'actifs non intégrés dans le périmètre comptable de l'organisation.
- La transparence avec le bailleur est essentielle pour obtenir les données de consommation.
- Pour les bâtiments loués, il est possible d'estimer les émissions via la surface occupée et des ratios d'intensité énergétique du parc.
- Bien distinguer cette catégorie de Scope 1/2 selon les règles de consolidation choisies (opérationnel ou financier).
- Documenter les hypothèses et les répartitions utilisées si les données sont mutualisées (ex. partage avec d'autres locataires).

Catégorie 9 : Transport et distribution en aval

Cette catégorie englobe les émissions de GES associées à l'acheminement physique des produits finis de l'organisation vers ses clients ou distributeurs finaux, lorsqu'elle fait appel à des prestataires logistiques externes. Elle couvre également les opérations de stockage, de manutention et de distribution en entrepôts ne relevant pas du périmètre opérationnel de l'organisation [26].

Elle s'applique dès lors que la responsabilité de la livraison incombe contractuellement à l'entreprise, mais que le transport ou l'entreposage sont sous-traités. Cette catégorie est particulièrement pertinente pour les secteurs manufacturiers, la grande distribution, l'agroalimentaire, ou les plateformes e-commerce.

Les émissions considérées incluent :

- les émissions liées au transport (routier, maritime, aérien, ferroviaire) externalisé pour la livraison des biens vendus.
- les émissions indirectes associées à la manutention et au stockage temporaire (entrepôts tiers, centres de tri, plateformes logistiques).
- les livraisons à domicile dans le cas de la vente au détail ou du e-commerce.
- les flux inter-sites clients (re-distribution, franchisés).

Cette catégorie ne couvre pas le transport en amont (traité dans la catégorie 4) ni le transport de produits loués (catégories 8 et 13).

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : distance parcourue \times poids (ou volume) \times facteur d'émission propre au mode de transport.
- **Spend-based** : dépenses logistiques totales multipliées par un facteur économique standardisé.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Poids}_i \times \text{Distance}_i \times \text{FE}_{\text{mode},i}) \quad (2.29)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\text{§}}) \quad (2.30)$$

Données à collecter :

- quantité de marchandises expédiées (kg, m³, palettes, TEU).
- type de transport (camion, train, avion, bateau) et son taux de remplissage.
- distance moyenne ou réelle jusqu'au client final.
- frais logistiques payés à des tiers.
- type d'entrepôt ou plateforme utilisée, avec surface ou consommation si disponible.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Ce poste est d'autant plus important que la chaîne logistique est internationale ou que le dernier kilomètre est externalisé.
- L'impact dépend fortement du mode utilisé (transport aérien très émetteur, maritime à fort volume mais intensité modérée).
- Bien distinguer les flux B2B (vers distributeurs) et B2C (livraisons domicile), souvent plus fragmentés.
- Utiliser les données des transporteurs partenaires ou plateformes (track trace, reporting logistique).

- Identifier les possibilités de regroupement ou mutualisation pour optimiser les flux.
- Pour le stockage externe : estimer la part d'énergie consommée pour la manutention, le froid, l'éclairage ou le chauffage des entrepôts.

Catégorie 10 : Traitement des produits vendus

Cette catégorie comptabilise les émissions de GES associées aux processus de traitement requis pour les produits une fois qu'ils quittent le contrôle de l'entreprise, mais avant leur fin de vie. Elle est particulièrement pertinente pour les produits qui nécessitent des phases de transformation, de raffinage, de nettoyage, de désassemblage ou de conditionnement supplémentaire par des acteurs tiers, dans la chaîne de valeur aval [26].

Elle concerne typiquement :

- les produits semi-finis ou intermédiaires destinés à être transformés avant consommation.
- les pièces détachées soumises à des assemblages post-vente.
- les biens nécessitant un traitement technique avant intégration (nettoyage, polissage, revêtement).
- les produits chimiques, plastiques ou minéraux devant être raffinés ou mélangés.
- les composants électroniques devant être reconfigurés ou testés en aval.

Cette catégorie s'applique uniquement lorsque l'entreprise ne contrôle pas ces opérations (elles sont sous-traitées ou réalisées par des clients) mais que le produit vendu ne peut être utilisé sans traitement complémentaire.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : utiliser les données spécifiques sur le type de traitement appliqué à chaque produit et multiplier par les facteurs d'émission correspondants (kg CO₂e/unité ou par kg traité).
- **Spend-based** : appliquer un facteur monétaire moyen si les coûts de traitement sont connus mais pas les volumes traités.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{traitement},i}) \quad (2.31)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.32)$$

Données à collecter :

- nature et quantité des produits nécessitant un traitement.
- type de processus de traitement appliqué (thermique, chimique, mécanique, etc.).
- localisation et technologie utilisée par le tiers (ex. électrolyse, bains acides, machines CNC).
- intensité carbone du processus (kWh, gaz, vapeur, solvants, etc.).
- dépenses engagées ou estimées pour ces opérations (factures ou coûts moyens).

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie est essentielle dans les chaînes industrielles complexes ou à forte dépendance externe.
- Les émissions varient fortement selon les procédés : ex. le traitement thermique d'aciers ou de céramiques est très énergivore.

- Bien distinguer cette catégorie de la fabrication initiale (prise en compte dans Scope 1 ou 3 amont).
- Recueillir des données via les clients industriels ou les plateformes de traitement est souvent nécessaire.
- Prévoir des estimations annuelles ajustables selon les volumes produits et traités.
- Séparer les flux selon le type de traitement pour mieux cibler les leviers de réduction (sous-traitance plus sobre, mutualisation des équipements).

Catégorie 11 : Utilisation des produits vendus

Cette catégorie englobe les émissions indirectes associées à l'utilisation des produits ou services vendus par l'organisation pendant toute leur durée de vie utile, lorsqu'ils consomment de l'énergie, du carburant ou entraînent des émissions en phase d'usage. Elle constitue souvent l'une des catégories les plus significatives du Scope 3 dans les secteurs industriels, technologiques, automobiles ou électroménagers [26].

Elle concerne notamment :

- les produits consommateurs d'énergie (véhicules, équipements électroniques, machines, électroménagers, etc.).
- les biens industriels utilisés dans des processus émissifs (turbines, chaudières, fours).
- les biens ou substances ayant un impact indirect (produits chimiques déclencheurs de réactions, matériaux générant des pertes thermiques, etc.).

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : multiplication de la consommation d'énergie pendant toute la durée de vie par un facteur d'émission énergétique.
- **Spend-based** : utilisé si seules les ventes en valeur sont connues, avec facteurs économiques par type de produit.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Consommation}_{\text{vie},i} \times \text{FE}_{\text{énergie},i}) \quad (2.33)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\text{g}}) \quad (2.34)$$

Données à collecter :

- nombre d'unités vendues et caractéristiques techniques.
- consommation énergétique moyenne par cycle, usage ou an.
- durée de vie prévue du produit (années, heures, cycles).
- mode d'utilisation typique (intensité, fréquence, profil utilisateur).
- source énergétique (électricité, essence, gaz naturel, etc.).
- facteurs d'émission associés (selon mix énergétique ou type de carburant).

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie est cruciale pour anticiper l'impact des produits sur leur phase la plus longue (jusqu'à 90% de leur empreinte carbone dans certains cas).
- Bien distinguer usage normal vs usage abusif ou détourné.
- Travailler sur l'écoconception : améliorer l'efficacité énergétique réduit directement ces émissions.

- Documenter les hypothèses d'usage (régionalisation, profils d'utilisateur).
- Lorsque les produits fonctionnent à l'électricité, appliquer le facteur d'émission du pays d'utilisation (ex. mix charbon/renouvelable).
- Sensibiliser les clients à l'impact carbone d'un mauvais usage ou d'une sous-maintenance.

Catégorie 12 : Traitement en fin de vie des produits vendus

Cette catégorie comptabilise les émissions de GES associées aux opérations de gestion des produits une fois arrivés en fin de vie, c'est-à-dire lorsqu'ils sont jetés, recyclés, incinérés, mis en décharge ou réutilisés. Bien que ces émissions soient générées par les clients ou des tiers, elles résultent directement de la conception, des matériaux et des quantités mises sur le marché par l'organisation [26].

Sont inclus :

- les biens durables (équipements, appareils, véhicules, etc.) une fois usés ou hors service.
- les produits à usage unique ou consommables.
- les emballages mis à disposition avec les produits (si non couverts par une autre catégorie).

Les types de traitement concernés :

- recyclage (fer, aluminium, plastiques, etc.).
- incinération avec ou sans récupération d'énergie.
- mise en décharge.
- traitement spécifique des substances dangereuses ou polluantes.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : masse de produit ou d'emballage par type \times facteur d'émission du traitement applicable.
- **Spend-based** : valeur estimée du coût de gestion des déchets \times facteur économique.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Quantité}_i \times \text{FE}_{\text{fin de vie},i}) \quad (2.35)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Montant}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.36)$$

Données à collecter :

- masse des produits mis sur le marché, par type de matériau (plastique, métal, etc.).
- durée de vie estimée, taux de retour ou de fin de vie annuelle.
- scénario de traitement fin de vie (répartition en % recyclé, incinéré, mis en décharge, etc.).
- facteurs d'émission pour chaque scénario de fin de vie (kg CO₂e/kg).
- données d'éco-organismes ou études sectorielles.

Enjeux et bonnes pratiques :

- L'impact dépend de la nature des matériaux et du mix de traitement utilisé.
- Des matériaux complexes (composites, mélangés) ont un taux de recyclabilité plus faible.
- Favoriser l'éco-conception (réduction matière, mono-matériaux, démontabilité) réduit directement cette catégorie.
- Documenter les hypothèses : durée de vie, géographie, disponibilité des filières de traitement.
- Inclure les emballages, notamment pour les produits vendus en B2C.
- Identifier les émissions évitées grâce au recyclage (selon la méthode « closed-loop » ou « open-loop » si pertinente).

Catégorie 13 : Biens loués en aval

Cette catégorie couvre les émissions associées à l'usage des biens loués à des tiers par l'organisation, c'est-à-dire les biens qu'elle met à disposition de clients ou partenaires sans en céder la propriété. Les émissions générées par l'usage de ces biens sont comptabilisées dans cette catégorie lorsque l'organisation conserve le contrôle opérationnel ou financier du bien, mais qu'il est utilisé par une entité externe [26].

Exemples de biens concernés :

- équipements industriels ou commerciaux loués à des clients.
- machines de chantier, générateurs, compresseurs.
- véhicules, flottes ou engins de transport en leasing.
- serveurs ou infrastructures informatiques hébergés mais opérés par des clients.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : évaluer la consommation énergétique ou les émissions directes générées par l'usage du bien, multipliée par un facteur d'émission approprié, sur toute la durée de location.
- **Spend-based** : utiliser les revenus issus de la location, multipliés par un facteur monétaire moyen.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Consommation}_i \times \text{FE}_{\text{énergie},i}) \quad (2.37)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Revenus}_i \times \text{FE}_{\$}) \quad (2.38)$$

Données à collecter :

- inventaire des biens loués et durée de location.
- caractéristiques techniques : puissance, capacité, type d'énergie utilisée.
- données de consommation énergétique ou d'utilisation (kWh, L, m³, heures).
- contrat de location ou revenus générés.
- taux d'occupation ou fréquence d'usage.

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie reflète la responsabilité indirecte de l'entreprise dans les usages intensifs ou prolongés de ses produits.
- Elle peut s'avérer significative pour les modèles économiques basés sur la location plutôt que la vente.
- Bien distinguer cette catégorie de la catégorie 11 (utilisation des produits vendus) qui concerne la cession de propriété.
- Collecter des données réelles d'utilisation ou estimer via des scénarios types (intensité, durée, profil client).
- Intégrer les émissions liées à la maintenance ou au transport du bien si inclus dans le contrat.
- Documenter les hypothèses de fréquence, efficacité énergétique et contexte d'usage.

Catégorie 14 : Franchises

Cette catégorie comptabilise les émissions indirectes provenant des activités des franchises exploitées par des tiers mais dont l'entreprise détient la marque, les droits commerciaux ou les standards opérationnels. Bien que ces franchises soient juridiquement indépendantes, l'entreprise en est partiellement responsable du point de vue des chaînes de valeur, notamment en raison du contrôle de l'image, de la stratégie et du modèle d'exploitation [26].

Elle est applicable aux :

- restaurants, magasins ou agences franchisés.
- points de vente ou services sous marque déposée.
- exploitations indépendantes opérant sous licence ou master franchise.

Méthodes de calcul :

- **Activity-based** : collecte directe ou estimation des données d'activité (consommation énergétique, carburants, processus industriels) dans les unités franchisées, multipliées par les facteurs d'émission appropriés.
- **Spend-based** : estimation des revenus générés par les franchises (ou redevances) multipliés par un facteur monétaire moyen.

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Activité}_i \times \text{FE}_i) \quad (2.39)$$

$$\text{Émissions} = \sum_i (\text{Revenus}_i \times \text{FE}_\$) \quad (2.40)$$

Données à collecter :

- nombre de franchises actives et leur localisation.
- données de consommation énergétique (électricité, gaz, carburants).
- surface, type d'activité, durée d'ouverture annuelle.
- données de production ou d'activité (nombre de clients, produits servis, etc.).
- redevances perçues, chiffre d'affaires franchisé.

Enjeux et bonnes pratiques :

- L'estimation peut être difficile sans engagement volontaire ou reporting environnemental des franchisés.
- Créer un référentiel type (franchise moyenne) à appliquer à l'ensemble du réseau permet d'approximer l'impact total.
- Mettre en place des clauses environnementales dans les contrats de franchise peut renforcer la transparence et la collecte de données.
- Séparer les émissions par pays ou zone géographique pour adapter les facteurs d'émission (mix énergétique, fiscalité carbone, etc.).
- Évaluer la part des émissions évitables par des actions globales (optimisation énergétique, formation, mutualisation logistique).

Catégorie 15 : Investissements

Cette catégorie regroupe les émissions associées aux actifs financiers détenus par l'organisation, notamment les participations, les prêts, les portefeuilles d'investissement, et les financements de projets. Elle s'applique particulièrement aux institutions financières, mais concerne aussi les entreprises industrielles ou commerciales disposant d'actifs dans d'autres structures juridiques [26].

Les types d'investissements couverts incluent :

- les actions ou parts détenues dans des filiales ou des projets tiers.
- les obligations, titres de créance, prêts octroyés.
- les projets d'infrastructure ou industriels financés partiellement.
- les financements durables ou non (green bonds, private equity, etc.).

Méthodes de calcul :

- **Activity-based (approche équivalente d'équité)** : part de l'investissement dans une entité \times émissions annuelles totales de cette entité.
- **Financed emissions (approche PCAF)** : application des règles de la Partnership for Carbon Accounting Financials (PCAF), basée sur les données financières consolidées.

$$\text{Émissions} = \sum_i \left(\frac{\text{Montant investi}_i}{\text{Valeur totale}_i} \times \text{Émissions totales}_i \right) \quad (2.41)$$

Données à collecter :

- liste complète des investissements (type, montant, durée).
- part détenue dans chaque entreprise ou projet.
- données d'émissions annuelles des entités financées (directes et indirectes).
- documents financiers (bilans, rapports d'impact, rapports extra-financiers).
- nature de l'activité financée (secteur, géographie, niveau de risque climatique).

Enjeux et bonnes pratiques :

- Cette catégorie est essentielle dans une logique de finance responsable ou de reporting extra-financier (CSRD, TCFD, SBTi).
- Elle permet de quantifier les émissions induites par l'allocation de capitaux, même sans lien opérationnel.
- Il est recommandé d'appliquer les recommandations PCAF (2022) pour homogénéiser les calculs au niveau mondial.
- L'évaluation doit couvrir à la fois les émissions historiques et les risques liés aux trajectoires futures.
- L'intégration de critères Environnementaux, Sociaux et Gouvernance (ESG) dans la politique d'investissement permet de réduire cette empreinte [28].
- L'approche d'attribution proportionnelle est à privilégier pour éviter la double comptabilisation.

2.4 Stratégies de réduction des émissions : typologie des leviers

Face à l'urgence climatique et aux engagements internationaux pris par les États et les entreprises (Accord de Paris, Objectifs de Développement Durable, CSRD), la réduction des émissions de GES s'impose comme un levier stratégique de transformation durable. Elle repose non seulement sur une comptabilité rigoureuse des émissions, mais aussi sur l'identification de leviers concrets, adaptés au périmètre d'activité et aux contraintes économiques de chaque organisation [29, 8].

Ces stratégies de réduction sont généralement structurées selon trois dimensions complémentaires :

- **Le périmètre d'émission concerné** (Scope 1, 2 ou 3), chacun présentant des leviers spécifiques et des marges de manœuvre différentes.
- **La nature du levier** : technologique, organisationnel, comportemental, réglementaire ou financier.
- **Les critères de priorisation** : potentiel de réduction, coût d'investissement, co-bénéfices, faisabilité technique, acceptabilité sociale, etc.

Une stratégie efficace combine des actions court terme (optimisation énergétique, sensibilisation, achats responsables) avec des leviers structurants à moyen/long terme (changement de modèle économique, innovation produits, décarbonation des chaînes d'approvisionnement) [30].

La typologie qui suit vise à catégoriser ces leviers, en les reliant à leur champ d'application (Scope), à leur fonction (réduction directe ou indirecte), et à leur niveau d'ambition (efficacité, substitution ou sobriété). Elle prépare ainsi le terrain pour leur sélection et leur déploiement, détaillés dans les sections suivantes.

2.4.1 Classification des leviers de réduction

Les leviers de réduction des émissions de GES peuvent être classés selon plusieurs grilles de lecture complémentaires, permettant d'orienter les choix stratégiques des organisations en fonction de leurs contraintes, priorités et capacités d'action [30, 29]. Trois typologies principales sont souvent mobilisées : par nature, par fonction et par niveau d'ambition.

Classification par nature du levier :

- **Technologiques** : recours à des équipements plus performants, électrification des usages, captage du CO₂, etc.
- **Organisationnels** : optimisation logistique, mutualisation de moyens, modes de production allégés.
- **Comportementaux** : changement de pratiques des employés, éco-conduite, réduction des déplacements.
- **Financiers** : mécanismes de tarification carbone, investissements verts, conditionnalité climatique.
- **Contractuels et réglementaires** : clauses environnementales dans les appels d'offres, certifications, labels.

Classification fonctionnelle selon le mode d'action :

- **Efficacité** : produire la même valeur avec moins de ressources ou d'énergie (ex. modernisation de chaudières).

- **Substitution** : remplacer une source à forte intensité carbone par une alternative bas-carbone (ex. gaz naturel → biogaz).
- **Sobriété** : réduire la demande ou l'intensité d'usage d'un produit ou service (ex. visio au lieu de déplacement).

Classification selon l'échelle d'impact :

- **Micro** : action ciblée sur une opération, un équipement ou un site.
- **Mésoscopique** : transformation d'un processus, d'un flux ou d'une chaîne de valeur.
- **Macroscopique** : changement systémique de modèle économique (économie circulaire, servicialisation, etc.).

Cette structuration permet non seulement de visualiser la diversité des actions possibles, mais aussi de les hiérarchiser selon des critères de faisabilité, d'investissement et de compatibilité avec une trajectoire de neutralité carbone. Elle constitue une base de travail indispensable à la définition d'un plan d'action cohérent et à l'évaluation ex post des impacts réels des mesures engagées [30, 8].

2.4.2 Leviers par périmètre d'émission

Les leviers de réduction peuvent être spécifiquement associés à chacun des trois scopes définis par le GHG Protocol. Cette catégorisation permet d'aligner les actions de réduction avec les sources d'émissions identifiées dans les bilans carbone, et de prioriser les efforts en fonction de la capacité de contrôle ou d'influence de l'entreprise sur chaque périmètre [9, 30].

2.4.2.1 Leviers du Scope 1 – Émissions directes

Les actions ciblent les émissions directement générées par les installations fixes ou mobiles appartenant à l'entreprise. Exemples :

- Remplacement des équipements à combustion par des technologies électriques ou hybrides.
- Réduction des fuites de fluides frigorigènes par maintenance préventive ou substitution de gaz.
- Optimisation des moteurs thermiques (régulation, carburants alternatifs).
- Refonte des procédés industriels énergivores.
- Détection et réduction des émissions fugitives.

2.4.2.2 Leviers du Scope 2 – Émissions indirectes liées à l'énergie

Ils portent sur la consommation d'électricité, de chaleur ou de vapeur achetée. Exemples :

- Achat d'électricité produite à partir de sources renouvelables (PPA, garanties d'origine).
- Installation de panneaux solaires, pompes à chaleur, géothermie.
- Isolation thermique des bâtiments, pilotage intelligent de l'énergie.
- Remplacement de l'éclairage par des LED à haute efficacité.
- Optimisation des horaires et équipements de climatisation ou de chauffage.

2.4.2.3 Leviers du Scope 3 – Émissions indirectes de la chaîne de valeur

Ce périmètre couvre une grande diversité d'activités. Les leviers varient selon les catégories mais incluent :

- **Amont** : achats responsables, sélection de fournisseurs bas carbone, relocalisation, analyse de cycle de vie (ACV).
- **Transport** : regroupement de commandes, véhicules bas émission, fret ferroviaire ou fluvial.
- **Déchets** : réduction à la source, recyclage, valorisation organique.
- **Aval** : éco-conception, allongement de durée de vie des produits, innovation fonctionnelle.
- **Mobilité** : incitation au télétravail, plan de déplacement entreprise, flottes électriques.
- **Investissements** : désengagement des actifs fossiles, financement de projets durables.

Cette approche par scope favorise une gestion stratégique différenciée des leviers, en tenant compte du degré de maîtrise de l'entreprise sur les postes émissifs (direct, indirect contrôlable, indirect influençable) [29].

2.4.3 Critères de sélection des leviers

La mise en œuvre d'une stratégie de réduction des émissions repose autant sur la rigueur de l'inventaire des GES que sur la capacité à sélectionner les bons leviers. Cette sélection ne peut se faire de manière intuitive ou isolée : elle nécessite une évaluation systémique à l'aide de critères multidimensionnels. Ces critères permettent de hiérarchiser les actions, d'optimiser les investissements et d'aligner les efforts avec les contraintes opérationnelles et les objectifs climatiques globaux [30, 8].

Impact climatique potentiel : L'un des premiers critères à considérer est l'effet direct du levier sur la réduction des émissions de GES. Cela peut se mesurer :

- par la quantité absolue de GES évités ou captés (en t CO₂e/an), en lien avec les postes émissifs les plus importants.
- par sa contribution à l'atteinte des trajectoires de neutralité compatibles avec les scénarios 1,5 °C ou 2 °C du GIEC, notamment via l'approche sectorielle SBTi.
- par la temporalité de son effet : certains leviers ont un impact immédiat (ex. basculement vers une électricité verte), d'autres un effet différé (ex. éco-conception produit ou changement logistique).

Faisabilité technique, organisationnelle et économique : Même si un levier est prometteur en termes de réduction, il doit rester techniquement applicable et économiquement soutenable. On évalue donc :

- les coûts d'investissement (Capital Expenditure (CAPEX)) et d'exploitation (Operational Expenditure (OPEX)) nécessaires à son déploiement.
- le retour sur investissement estimé (en € par t CO₂e évitée), ainsi que les économies potentielles sur le long terme (énergie, maintenance, taxe carbone).
- la maturité technologique (Technology Readiness Level – Technology Readiness Level (TRL)) du levier, et sa compatibilité avec les infrastructures existantes.
- la disponibilité de la solution sur le marché (fournisseurs, équipements, logiciels).
- les capacités internes à assurer sa mise en œuvre (RH, temps, conduite du changement).

Co-bénéfices environnementaux, sociaux et économiques : Un bon levier est souvent celui qui permet de générer des effets positifs au-delà de la seule réduction des émissions :

- réduction des autres pollutions ou nuisances (bruit, particules fines, déchets).
- amélioration de la santé et de la sécurité au travail (ex. réduction des transports).
- valorisation de l'image de marque (ex. labels, critères ESG, reporting RSE).
- avantage concurrentiel sur des marchés à faible empreinte (écoconception, marchés publics durables).
- amélioration de la résilience face aux risques climatiques ou aux régulations futures.

Acceptabilité sociale et mobilisation : Un levier techniquement pertinent peut échouer s'il rencontre une forte résistance culturelle, organisationnelle ou politique. Il est donc crucial de mesurer :

- l'acceptabilité interne (collaborateurs, syndicats, équipes opérationnelles).
- l'impact perçu sur la charge de travail, le confort, ou les habitudes.
- la lisibilité et la pédagogie de la mesure auprès des parties prenantes.
- le niveau d'implication du top management et sa capacité à porter le levier.
- la cohérence avec les valeurs de l'entreprise ou ses engagements publics.

2.5 Apports de la digitalisation à la gestion environnementale

Face à la complexité croissante des enjeux environnementaux et à la multiplication des obligations réglementaires (CSRD, taxonomie verte, ISO 14068), les outils numériques apparaissent comme des leviers essentiels pour structurer, automatiser et fiabiliser la gestion des émissions de GES. La convergence entre transition écologique et transition numérique donne ainsi naissance à une nouvelle approche intégrée, où la donnée devient un socle stratégique de pilotage environnemental [15].

La digitalisation permet, d'une part, de centraliser des volumes importants de données issues de sources hétérogènes (comptabilité, capteurs, systèmes Enterprise Resource Planning (ERP), fournisseurs, bases d'émission), et d'autre part, de produire des analyses dynamiques, en temps réel, favorisant la réactivité et la transparence. Les logiciels spécialisés dans le calcul des bilans carbone, l'analyse de cycle de vie (ACV), ou encore la planification bas-carbone se multiplient et intègrent désormais des fonctionnalités d'intelligence artificielle, de modélisation prédictive et de visualisation avancée.

Plus largement, la digitalisation contribue à renforcer la traçabilité des actions, la documentation des hypothèses, la comparaison interannuelle des performances et la remontée d'indicateurs ESG à l'échelle corporate ou territoriale. Elle soutient aussi la mobilisation des acteurs internes par le biais de tableaux de bord interactifs, d'alertes en cas de dépassement, ou de simulation d'objectifs par poste émetteur [10].

Néanmoins, l'essor du numérique dans la gestion environnementale soulève également de nouveaux défis : standardisation des formats de données, sécurisation des flux, coût de mise en œuvre, dépendance technologique, ou encore impact environnemental propre aux systèmes d'information (green IT). Ces limites doivent être intégrées dans toute stratégie de numérisation responsable, afin d'éviter les effets rebond ou les dérives méthodologiques.

La section suivante vise à classer plus précisément les outils numériques actuellement mobilisés dans la gestion des GES, tout en identifiant les enjeux associés à leur déploiement.

2.5.1 Le numérique au service de la transition bas-carbone

La transition bas-carbone des entreprises et des institutions ne repose pas uniquement sur des choix technologiques ou énergétiques, mais aussi sur une capacité croissante à exploiter la donnée pour mesurer, comprendre et piloter les émissions de GES. Dans ce contexte, la digitalisation apparaît comme un catalyseur de transformation en rendant possible une gestion environnementale plus réactive, granulaire et systémique [31, 15].

Le numérique intervient à plusieurs niveaux dans les stratégies climatiques :

- **Collecte automatisée des données** issues de systèmes de gestion (ERP), capteurs, factures, équipements connectés (internet of things (IoT)), etc.
- **Traitement et agrégation** via des bases de données environnementales (facteurs d'émission, données d'activité, flux matières).
- **Modélisation et simulation** de scénarios de réduction, d'objectifs SBTi ou de trajectoires 1,5 °C.
- **Visualisation dynamique** des résultats à travers des tableaux de bord personnalisés, indicateurs clés (key performance indicator (KPI)) et alertes en temps réel.
- **Communication et transparence** renforcées à destination des parties prenantes internes et externes.

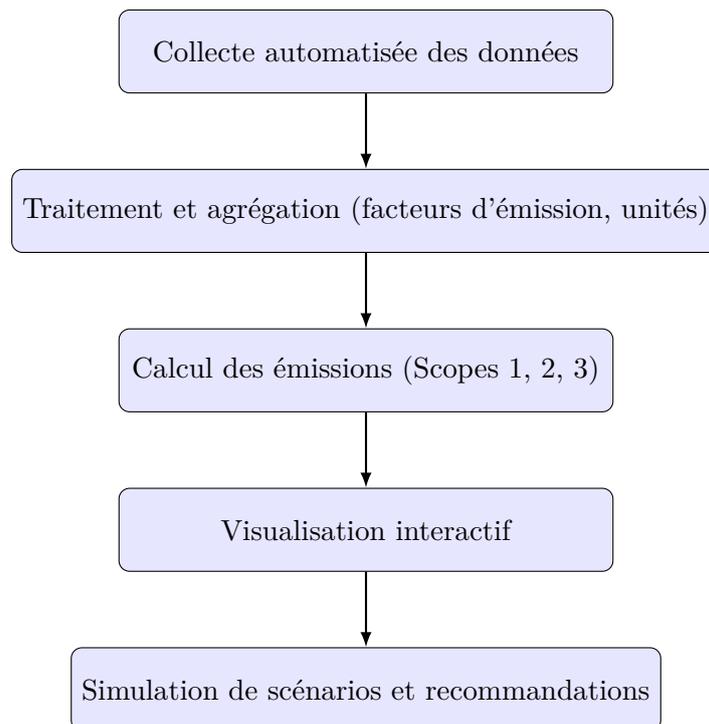


FIGURE 2.6 – Architecture verticale d'un outil digital de comptabilité carbone

Cette intégration du numérique au service du climat s'inscrit dans une logique de convergence des transitions : écologique, énergétique et numérique. Elle est portée par les cadres réglementaires émergents (CSRD, taxonomie verte, ISO 14068), mais aussi par les exigences du marché financier (CDP, TCFD) et les attentes sociétales croissantes en matière de responsabilité environnementale [29, 32].

Loin de se limiter à une question de reporting, la digitalisation permet ainsi aux organisations d'entrer dans une dynamique de progrès continu, en s'appuyant sur des données fiables, historisées et contextualisées. Elle prépare également le terrain à l'automatisation partielle

ou totale de certaines actions correctives (régulation énergétique, déclenchement d'alertes, reconfiguration de chaînes logistiques), dans une logique d'optimisation continue de l'empreinte carbone.

2.5.2 Typologie des outils numériques pour la gestion des GES

Les outils numériques utilisés pour la gestion des émissions de GES se sont multipliés et diversifiés au cours des dernières années, répondant à la fois à des besoins de conformité réglementaire, d'optimisation opérationnelle et de transparence. Ils forment un écosystème technologique articulé autour de quatre fonctions principales : la collecte, le calcul, l'analyse et le pilotage [14, 10].

Logiciels de comptabilité carbone : Ces outils permettent d'établir des bilans d'émissions (Scopes 1, 2 et 3) à partir de données d'activité (consommations, achats, déplacements, etc.) croisées avec des bases de facteurs d'émission. Ils intègrent souvent :

- des bases de données certifiées (Base Carbone, DEFRA, EPA, GHG Protocol).
- des modules d'import automatisé depuis les systèmes ERP ou comptables.
- des outils de consolidation multi-sites ou multi-filiales.
- la génération de rapports conformes aux standards GHG ou BEGES réglementaires.

Plateformes de gestion environnementale intégrée (EMS) : Plus complètes que les simples calculateurs carbone, ces plateformes permettent de gérer l'ensemble des indicateurs environnementaux (eau, énergie, matières, déchets, etc.), avec :

- des tableaux de bord dynamiques.
- des modules de suivi d'objectifs (SBTi, neutralité, KPI).
- des alertes automatisées.
- des interfaces collaboratives inter-services ou inter-entreprises.

Outils d'ACV et d'écoconception : Certains logiciels intègrent des moteurs d'ACV pour évaluer l'empreinte environnementale d'un produit sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. Ces outils sont particulièrement utilisés dans l'industrie, l'agroalimentaire ou la construction. Ils permettent :

- d'identifier les étapes critiques en termes d'impact carbone.
- de comparer des alternatives techniques ou des scénarios d'écoconception.
- de générer des fiches PEF/OEF (Product Environmental Footprint).

Systemes d'aide à la décision et d'intelligence carbone. De plus en plus, les plateformes numériques embarquent des fonctionnalités avancées d'aide à la décision, notamment via :

- la simulation d'actions de réduction et leurs effets prévisionnels (€/t CO₂e).
- des moteurs de recommandations basés sur des règles ou de l'IA.
- la priorisation automatique des postes à fort impact.
- des cartographies dynamiques de la chaîne de valeur.

Cette typologie reflète la progression continue des capacités technologiques mises au service de la décarbonation. Toutefois, leur efficacité dépend fortement de la qualité des données saisies, de leur intégration dans les processus de gouvernance, et de la formation des utilisateurs finaux [31].

2.5.3 Limites, enjeux éthiques et perspectives d'évolution

Si les outils numériques offrent des opportunités considérables pour la gestion environnementale, leur généralisation soulève aussi un ensemble de limites techniques, méthodologiques, éthiques et écologiques qu'il est indispensable de prendre en compte dans une démarche responsable.

Fiabilité et qualité des données : Les résultats issus des plateformes dépendent fortement de la qualité, de la fréquence et de la représentativité des données saisies. Or, de nombreuses entreprises rencontrent encore des difficultés à accéder à des données complètes, normalisées et vérifiables, en particulier pour le Scope 3. La fiabilité des bilans et la robustesse des leviers proposés en dépendent directement [14].

Dépendance aux facteurs d'émission standards : La majorité des outils numériques s'appuie sur des bases de facteurs d'émission génériques (ADEME, DEFRA, EPA), dont l'actualisation ou l'adaptation au contexte local reste limitée. Cette standardisation, bien que pratique, peut engendrer des approximations ou une perte de finesse dans l'analyse.

Empreinte environnementale du numérique : Les systèmes d'information eux-mêmes génèrent des impacts environnementaux : consommation énergétique des serveurs, fabrication des équipements, refroidissement des data centers, fin de vie des matériels. Selon l'ADEME, le numérique représenterait déjà près de 4 % des émissions mondiales de GES, et ce chiffre pourrait doubler d'ici 2025 sans sobriété numérique [31].

Risques de pilotage algorithmique biaisé : L'automatisation croissante des recommandations (via l'intelligence artificielle, le machine learning, ou la prédiction) peut conduire à des décisions biaisées si les modèles sont mal calibrés, opaques ou entraînés sur des jeux de données incomplets. Ces biais peuvent compromettre la pertinence des leviers identifiés et poser des questions éthiques de responsabilité [15].

Gouvernance, souveraineté et sécurité des données : La centralisation croissante des données environnementales dans des solutions cloud pose des questions de souveraineté (dépendance à des éditeurs étrangers), de sécurité (cyberattaques), et de confidentialité (données sensibles sur la chaîne de valeur ou les fournisseurs). Une gouvernance rigoureuse est donc indispensable.

Perspectives : Les évolutions futures s'orientent vers des plateformes plus ouvertes, interopérables, capables d'intégrer des données primaires issues des fournisseurs, des capteurs en temps réel ou de la blockchain. Les standards émergents (CSRD, ISO 14068, PEF/OEF) imposent une plus grande rigueur méthodologique. Enfin, la montée en puissance des exigences extra-financières et des labels (SBTi, CDP, TCFD) stimule l'innovation numérique tout en renforçant la nécessité d'un encadrement éthique, transparent et éco-responsable [32].

2.6 Revue des outils existants et positionnement de la solution proposée

La numérisation de la comptabilité carbone a donné lieu à l'émergence d'une diversité croissante d'outils logiciels, conçus pour accompagner les organisations dans le calcul, l'analyse et la réduction de leurs émissions de GES. Ces outils se distinguent par leur couverture fonctionnelle, leur architecture technique, leur niveau d'automatisation et leur public cible (grands groupes, PME, institutions publiques, etc.). Cette section présente une revue critique de ces solutions,

avant d'introduire les principes structurants de la solution envisagée.

2.6.1 Panorama des outils numériques de comptabilité carbone disponibles

Le marché des solutions digitales dédiées à la comptabilité carbone connaît une forte expansion, porté à la fois par l'évolution des exigences réglementaires (CSRD, taxonomie verte), la pression des parties prenantes (CDP, investisseurs) et la volonté croissante des entreprises de piloter leur transition climatique. Ces outils se déclinent en plateformes web, logiciels software as a service (SaaS), API spécialisées ou modules intégrés aux ERP existants [33].

Parmi les acteurs les plus connus en Europe, on peut citer :

- **Greenly** : solution SaaS française orientée vers les PME et ETI, intégrant un calcul automatisé des émissions, des tableaux de bord dynamiques et une recommandation de plans d'action.
- **Toovalu** : outil modulaire permettant d'élaborer des feuilles de route climat alignées sur les méthodologies SBTi, avec des indicateurs personnalisables.
- **CarbonFact** : solution spécialisée dans l'analyse d'empreinte produit (Scope 3), notamment dans l'habillement et l'industrie manufacturière.
- **Sami** : plateforme intuitive pour startups et TPE, avec un accompagnement pédagogique.
- **EcoAct / Atos** : offre de reporting climat avancée, destinée aux grandes entreprises, intégrant audit, stratégie, ACV et simulation de scénarios.

À l'échelle internationale, d'autres acteurs comme **Persefoni**, **Watershed**, **Normative** ou **Plan A** proposent des solutions plus orientées vers les exigences anglo-saxonnes (SEC, TCFD, GRI), avec des connecteurs vers les logiciels comptables et financiers.

Ces plateformes offrent généralement les fonctionnalités suivantes :

- import automatique ou semi-automatique des données d'activité.
- correspondance avec des bases de facteurs d'émission (ADEME, DEFRA, EPA, GHG Protocol).
- consolidation multi-entités et multi-scopes.
- export des résultats au format GHG Protocol, BEGES, ou rapport ESG.
- accompagnement à la définition de trajectoires SBTi ou Net Zero.

Certaines solutions open source existent également, comme **OpenGHG** ou des bibliothèques Python/R dédiées, mais leur usage reste limité aux profils techniques ou académiques. Globalement, ces outils représentent une avancée majeure vers la systématisation de la comptabilité carbone, mais leur accessibilité, leur souplesse d'adaptation et leur couverture du Scope 3 restent variables selon les cas [33].

2.6.2 Limites observées dans les solutions actuelles

Malgré leur prolifération et leur sophistication croissante, les outils numériques de comptabilité carbone présentent encore certaines limites techniques, méthodologiques et économiques, susceptibles de freiner leur adoption ou d'en réduire la portée opérationnelle [33].

Difficulté d'adaptation aux contextes spécifiques : Nombre de solutions proposent des modèles standardisés fondés sur des facteurs d'émission génériques. Or, les spécificités sec-

torielles, géographiques ou organisationnelles (présence multi-sites, sous-traitance, fonctionnement hybride) sont souvent mal intégrées, ce qui limite la pertinence des résultats.

Couverture incomplète du Scope 3 : Alors que le Scope 3 représente souvent plus de 80 % des émissions totales d'une entreprise, son traitement par les outils est encore partiel. Certaines catégories complexes (ex. : investissements, biens d'équipement, fin de vie des produits vendus) sont négligées ou mal modélisées, faute de données disponibles ou de méthodes adaptées.

Accessibilité économique limitée : Les solutions les plus complètes sont souvent proposées sous forme de licences coûteuses, difficilement abordables pour les TPE/PME. À cela s'ajoutent des frais d'intégration, de formation et de support parfois conséquents, qui freinent la démocratisation de ces outils.

Complexité technique et manque de pédagogie : Certaines plateformes supposent une forte maturité technique de la part des utilisateurs, en particulier lorsqu'il s'agit de configurer des facteurs personnalisés, d'exploiter des API ou de paramétrer des simulations avancées. Or, une partie des entreprises concernées ne disposent ni de ressources internes qualifiées, ni de temps suffisant pour cette montée en compétence.

Intégration limitée dans les systèmes existants : L'interopérabilité avec les logiciels comptables, les ERP ou les bases fournisseurs est encore inégale. Les imports de données doivent souvent être réalisés manuellement, ce qui augmente le risque d'erreur et freine l'automatisation du reporting.

Ces limites, identifiées par de nombreuses entreprises interrogées dans le cadre d'études récentes, soulignent la nécessité de concevoir des outils plus modulaires, pédagogiques, abordables, et mieux alignés sur la réalité opérationnelle des organisations [33].

2.6.3 Positionnement technologique de la solution proposée

Face aux limites identifiées dans les solutions existantes, plusieurs axes d'optimisation peuvent guider le développement de nouvelles plateformes plus adaptées à la réalité de terrain en particulier dans des contextes industriels ou semi-numérisés. La solution envisagée s'inscrit dans cette logique d'hybridation entre automatisation partielle et intervention humaine structurée.

Approche modulaire par catégorie d'émissions : Contrairement à certains outils proposant une approche globale et peu personnalisable, la solution proposée adopte une logique progressive : chaque catégorie d'émissions (Scope 1, 2, 3) est traitée séparément, avec des tableaux d'entrée spécifiques et des hypothèses explicitées.

Accessibilité et adaptabilité : La solution vise à être techniquement accessible à des structures de taille moyenne, tout en permettant des ajustements manuels (injection de facteurs d'émission personnalisés, hypothèses de modélisation, intégration de fichiers sources). Cette souplesse favorise l'adaptabilité à des cas spécifiques comme ceux des centres de services industriels ou des PME opérant dans des contextes peu standardisés.

Intégration progressive des leviers de réduction : En plus du calcul des émissions, la solution introduit une logique d'interprétation qualitative des résultats, orientée vers la formulation de recommandations de réduction. Celles-ci peuvent être fondées sur des seuils d'intensité carbone, des benchmarks sectoriels ou des bonnes pratiques référencées (ADEME, ISO, etc.), avec une progressivité selon la maturité de l'organisation.

Complémentarité avec les référentiels existants. Enfin, la solution ne prétend pas remplacer les plateformes standards, mais plutôt en combler certaines lacunes : elle peut servir de pré-diagnostic, de support pédagogique ou de démonstrateur technique avant un déploiement plus complet. Elle s'inscrit dans la continuité des recommandations du GHG Protocol, de la CSRD, et des principes du Green IT.

Ce positionnement hybride vise à répondre à des besoins concrets, identifiés dans les retours d'expérience utilisateurs, tout en restant aligné sur les exigences de transparence, de traçabilité et de robustesse méthodologique attendues dans les bilans d'émissions de GES.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondements scientifiques, méthodologiques et technologiques indispensables au développement d'un système digitalisé de comptabilité carbone aligné sur les standards du GHG Protocol. La compréhension des mécanismes liés aux émissions de GES, leur classification en périmètres normés (Scopes 1, 2 et 3) ainsi que l'analyse détaillée des quinze catégories du Scope 3 ont permis de structurer une approche complète et rigoureuse du bilan carbone organisationnel.

Les leviers de réduction ont été présentés selon une typologie fonctionnelle et stratégique, soulignant la nécessité d'une priorisation des actions selon des critères multidimensionnels (impact climatique, faisabilité, co-bénéfices, acceptabilité). Cette réflexion permet d'orienter le système non seulement vers la quantification, mais également vers la proposition d'actions concrètes.

Enfin, les apports de la digitalisation à la gestion environnementale ont été analysés, à travers une revue des outils disponibles, une mise en lumière de leurs limites, et un positionnement technologique de la solution envisagée. Ce socle théorique et technologique constitue ainsi le cadre de référence sur lequel repose la conception du système semi-digitalisé développé dans les chapitres suivants.

Chapitre 3

Conception et Développement du Système Digitalisé

3.1 Introduction

Ce chapitre présente en détail la conception et le développement du système digitalisé mis en place pour l'évaluation semi-automatisée des émissions de gaz à effet de serre. Il s'agit du cœur technique du projet, traduisant les exigences méthodologiques du GHG Protocol en une solution logicielle fonctionnelle, modulaire et évolutive.

L'objectif principal de cette étape est de construire un outil numérique capable d'intégrer des données d'activité réelles, d'appliquer des facteurs d'émission appropriés, de produire des résultats structurés et de formuler des recommandations pertinentes en matière de réduction des émissions. Le système repose sur une architecture web répartie, articulée autour d'une interface utilisateur (React), d'un serveur de traitement (Django) et d'une base de données relationnelle (PostgreSQL), assurant à la fois souplesse d'utilisation et robustesse dans le traitement des données environnementales.

Ce chapitre aborde ainsi les choix techniques et méthodologiques retenus, le fonctionnement global de la plateforme, le parcours utilisateur, les principes de calcul appliqués, les leviers de réduction intégrés, ainsi que les principales limites actuelles et pistes d'évolution futures du système.

3.2 Objectifs et portée du système développé

Le système digitalisé développé dans le cadre de ce projet a été conçu comme un outil de calcul semi-automatisé des émissions de gaz à effet de serre, s'appuyant sur une logique modulaire et évolutive. L'objectif principal est d'opérationnaliser, dans un environnement numérique accessible, les principes méthodologiques du GHG Protocol en matière d'évaluation des émissions des Scopes 1, 2 et 3, à partir de données d'activité structurées.

Le système a pour vocation de permettre à un utilisateur technique de configurer un périmètre de calcul, d'importer les données relatives à chaque catégorie retenue, d'appliquer les facteurs d'émission adéquats, et de visualiser les résultats de manière synthétique. Il s'agit donc d'un outil d'aide à la quantification et à l'interprétation des émissions, intégrant une logique de traitement séquentiel par catégorie. Il autorise la prise en compte sélective des catégories pertinentes

selon le contexte de l'organisation.

Dans sa version actuelle, le système reste destiné à un usage restreint. L'intégration des facteurs d'émission n'est pas automatisée : elle repose sur une saisie manuelle contextualisée lors de l'import des données. De même, les leviers de réduction proposés à l'issue du calcul ne sont pas générés dynamiquement par le système mais encodés en dur dans l'interface frontale, à partir d'une analyse préalable effectuée par le développeur.

Ce choix de fonctionnement semi-manuel reflète une approche pragmatique adaptée à une phase de prototypage, dans laquelle la robustesse des calculs, la structure des interfaces et la lisibilité des résultats sont priorisés par rapport à l'automatisation complète. Le système fournit ainsi un socle opérationnel sur lequel pourront s'adosser des évolutions futures, telles que l'enrichissement automatique de la base de facteurs d'émission, la personnalisation des leviers de réduction ou encore l'ouverture à des utilisateurs tiers.

3.3 Architecture générale du système

Le système développé repose sur une architecture web répartie, combinant une interface utilisateur dynamique, un serveur applicatif de traitement et une base de données relationnelle. Cette structure vise à assurer la lisibilité du parcours d'utilisation, la fiabilité des calculs effectués, ainsi que la modularité des composants pour faciliter les évolutions futures.

L'architecture adoptée suit une logique de séparation des responsabilités (front-end, back-end, base de données) avec un fonctionnement de type client-serveur. Le traitement des fichiers importés, la structuration des données, l'application des facteurs d'émission, l'agrégation des résultats et l'enregistrement des interactions sont distribués entre les différentes couches logicielles. Chaque module fonctionne de manière complémentaire, en assurant une gestion fluide et cohérente des entrées, traitements et sorties.

L'interface utilisateur, développée en React, permet de configurer le périmètre d'analyse, d'importer les fichiers relatifs aux différentes catégories d'émissions et de visualiser les résultats agrégés. Le traitement des données et les opérations de calcul sont assurés côté serveur, via un back-end développé en Python avec le framework Django. La base de données PostgreSQL est utilisée pour stocker les données d'entrée traitées, les résultats intermédiaires et les métadonnées associées.

Cette architecture a été pensée dans une logique de prototypage robuste, permettant à un utilisateur technique de réaliser un traitement complet des données d'émissions sur une plateforme centralisée. Bien que le système ne soit pas encore ouvert à des utilisateurs externes et ne soit pas encore totalement automatisé, sa structure technique offre des perspectives d'extension vers des fonctionnalités avancées telles que la gestion multi-utilisateurs, l'ajout dynamique de facteurs d'émission ou l'intégration de bibliothèques d'émission tierces. La figure ci-dessous illustre l'architecture technique générale du système, fondée sur une répartition claire entre interface utilisateur, serveur de traitement et base de données relationnelle.

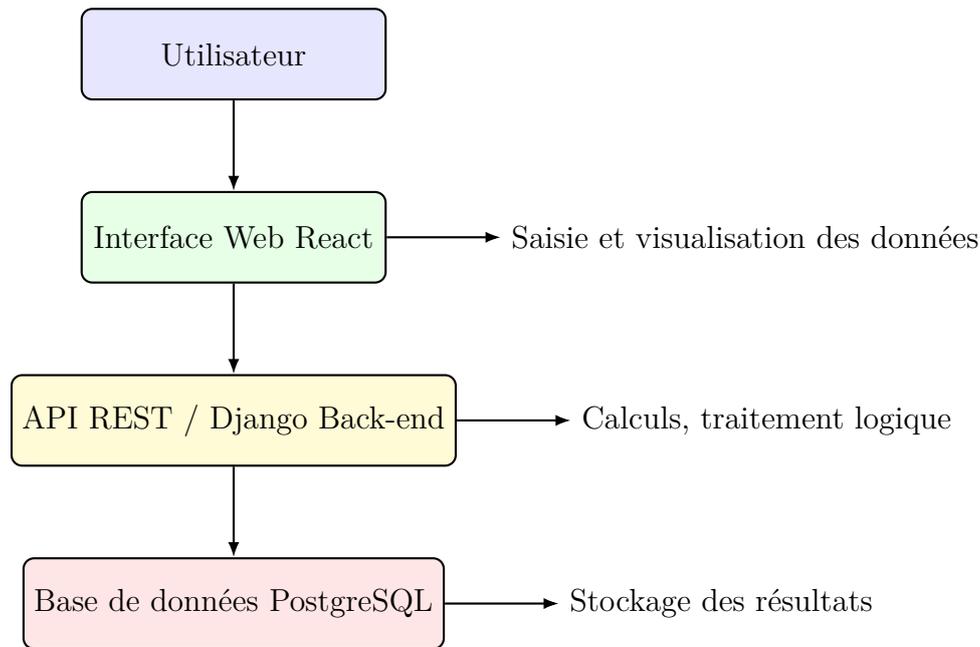


FIGURE 3.1 – Architecture technique du système digitalisé

3.3.1 Vue d'ensemble fonctionnelle

Sur le plan fonctionnel, le système est structuré autour de trois blocs principaux : le module d'entrée des données, le moteur de traitement et de calcul, et l'interface de restitution des résultats. Chacun de ces blocs contribue à assurer la cohérence globale du processus d'évaluation des émissions, depuis l'importation des données brutes jusqu'à la génération d'indicateurs interprétables.

Le module d'entrée permet à l'utilisateur de définir les catégories d'émissions à inclure dans le périmètre d'analyse, puis d'importer les fichiers correspondant à chacune d'elles. Pour chaque catégorie sélectionnée, le système affiche le format attendu des données et propose une interface d'envoi de fichiers. Cette phase est cruciale, car elle conditionne la précision du calcul en fonction des facteurs d'émission qui seront appliqués.

Une fois les fichiers importés, le moteur de traitement exécute plusieurs étapes successives : vérification de la structure des données, nettoyage éventuel, application des facteurs d'émission renseignés manuellement, puis agrégation des résultats au niveau de la catégorie et du périmètre. Cette étape repose sur une logique algorithmique rigoureuse.

Enfin, le module de restitution organise les résultats dans un tableau de bord synthétique, intégrant la somme des émissions par Scope, des visualisations graphiques par catégorie, et une série de recommandations contextuelles sous forme de leviers de réduction. Ces derniers sont définis statiquement dans l'interface frontale selon une logique déterminée à l'avance, mais leur affichage dépend des résultats obtenus dans chaque cas.

La cohérence fonctionnelle de l'ensemble repose sur un enchaînement simple mais structuré des tâches, assurant un déroulement progressif des étapes, une visualisation immédiate des résultats intermédiaires, et une interprétation facilitée des données finales.

3.3.2 Modules principaux

L'architecture du système repose sur une organisation modulaire en trois couches logicielles distinctes : l'interface utilisateur (front-end), le serveur applicatif (back-end) et la base de données. Cette séparation garantit une meilleure maintenabilité, une évolutivité fonctionnelle, ainsi qu'une répartition claire des responsabilités.

Interface utilisateur – Front-end

Le front-end du système a été développé avec le framework React, une bibliothèque JavaScript libre conçue pour créer des interfaces dynamiques, modulaires et réactives. Cette solution permet une gestion efficace des composants et de l'état de l'interface, ce qui facilite la navigation entre les différentes catégories d'émissions, le chargement conditionnel des fichiers et la mise à jour instantanée des résultats affichés. React est aujourd'hui l'un des outils dominants dans la conception d'interfaces web interactives [34].

Serveur applicatif – Back-end

Le traitement des données et les opérations de calcul sont réalisés côté serveur via le framework Django. Ce framework open-source basé sur Python est reconnu pour sa robustesse, sa rapidité de développement et sa capacité à gérer des architectures web complexes. Il prend en charge le routage, la validation des formulaires, la sécurisation des échanges et la logique métier liée au traitement des fichiers Comma-Separated Values (CSV) et à l'application des facteurs d'émission. Django est particulièrement adapté aux systèmes modulaires nécessitant une bonne séparation entre logique serveur et interface [35].

Base de données – PostgreSQL

Les résultats traités sont stockés dans une base de données PostgreSQL, un système de gestion relationnelle reconnu pour sa conformité Atomicity, Consistency, Isolation, Durability (ACID), sa robustesse et ses performances sur les volumes intermédiaires de données. PostgreSQL permet d'organiser les tables de manière cohérente selon les catégories de Scope, d'enregistrer les résultats intermédiaires, et de conserver un historique structuré des traitements. Il supporte également les requêtes complexes, les contraintes d'intégrité et les indexations nécessaires pour l'optimisation du calcul GES [36].

Le tableau ci-dessous résume les principaux modules logiciels qui composent l'architecture du système, en précisant les technologies utilisées, leurs fonctions et leur rôle dans le traitement des données.

TABLE 3.1 – Résumé des modules logiciels constituant l’architecture du système.

Module	Technologie	Fonction	Rôle dans le système
Interface utilisateur	React	Front-end	Permet à l’utilisateur de configurer le périmètre, importer les fichiers et visualiser les résultats.
Serveur applicatif	Django (Python)	Back-end	Exécute les traitements, applique les facteurs d’émission et orchestre les calculs par catégorie.
Base de données	PostgreSQL	Stockage	Conserve les données d’entrée, les résultats intermédiaires, les agrégats par Scope et les métadonnées.

3.3.3 Mode de fonctionnement actuel

La version actuelle du système a été conçue comme une plateforme fonctionnelle de préfiguration, destinée à démontrer la faisabilité d’un outil semi-digitalisé d’évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Son déploiement reste volontairement limité à un usage interne, réservé au développeur du projet. Cette configuration permet un contrôle total sur l’intégration des paramètres d’entrée, le déclenchement des traitements, et l’interprétation des résultats.

L’une des particularités majeures de cette version réside dans l’intégration manuelle des facteurs d’émission. Ceux-ci ne sont pas extraits automatiquement d’une base centralisée, mais renseignés au moment de l’importation des données pour chaque catégorie. Ce choix permet d’adapter avec précision les coefficients utilisés aux spécificités de l’organisation étudiée, tout en conservant une certaine souplesse dans la gestion des unités et des sources.

De la même manière, les leviers de réduction des émissions ne sont pas générés automatiquement par le système. Leur affichage dans l’interface est conditionné par les résultats du calcul, mais leur sélection et leur contenu sont définis à l’avance dans le code source, à partir d’une analyse préalable réalisée par le développeur. Cette logique permet d’établir un lien explicite entre les postes d’émissions dominants et les recommandations associées, tout en laissant ouverte la possibilité d’un futur module de suggestion automatisée.

3.4 Parcours utilisateur et interface

L’interface développée dans le cadre de ce système repose sur une progression structurée en plusieurs étapes logiques, visant à accompagner l’utilisateur dans la configuration de son périmètre d’analyse, l’intégration des données, le déclenchement du traitement, et la consultation des résultats. Chaque étape est associée à un composant spécifique de l’interface, garantissant à la fois lisibilité, guidage et modularité. Cette section décrit le déroulement fonctionnel tel qu’il se présente à l’utilisateur. La figure suivante synthétise les étapes successives du parcours utilisateur, depuis la configuration initiale jusqu’à la restitution finale des résultats dans le tableau de bord.

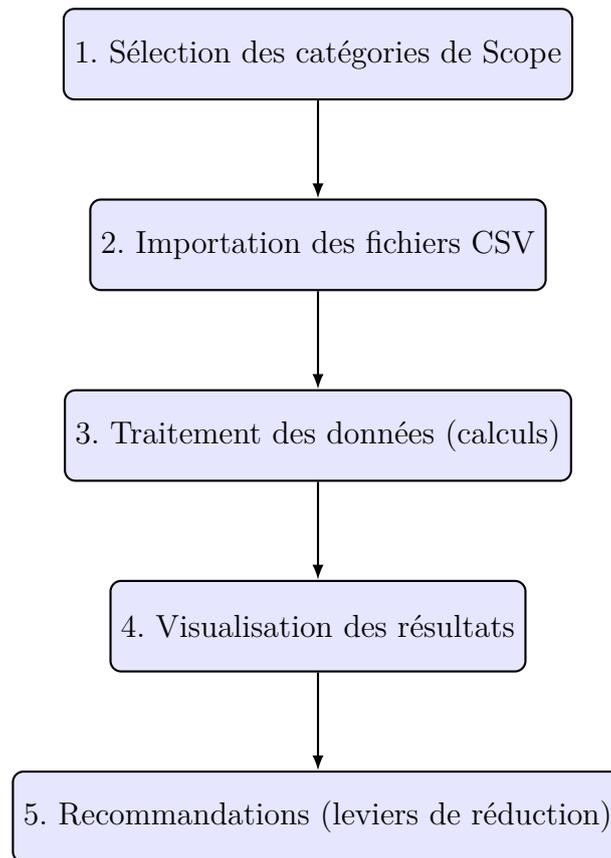


FIGURE 3.2 – Étapes principales du parcours utilisateur dans l’interface du système

3.4.1 Sélection initiale des catégories de Scope

La première étape consiste à définir les catégories d’émissions que l’utilisateur souhaite inclure dans le périmètre d’évaluation. Une interface de sélection permet de cocher les catégories disponibles pour les Scopes 1, 2 et 3. Cette sélection conditionne les étapes suivantes du parcours, seules les catégories activées seront traitées, et seules leurs interfaces de saisie et de calcul seront accessibles.

Cette approche offre une flexibilité d’analyse, en permettant à l’utilisateur de concentrer le calcul sur les seuls postes d’émissions pertinents pour son organisation, tout en limitant la charge de saisie de données.

3.4.2 Téléversement des données

Pour chaque catégorie sélectionnée, l’interface présente un module indépendant de téléversement. Ce module contient :

- Une visualisation de la structure attendue du fichier d’entrée : le système affiche un exemple de tableau, avec les noms de colonnes, le type de données attendues, et les unités recommandées. Cela permet à l’utilisateur de préparer correctement ses données.
- Une fonction de traitement déclenchée par un bouton **Process File**, qui applique les facteurs d’émission exécute les calculs pour la catégorie en question, et affiche immédiatement le résultat sous forme de valeur numérique (en kg de CO₂e).

Cette phase est répétée pour chaque catégorie activée au départ, permettant une gestion indépendante et séquentielle des blocs d'émissions à traiter. Le tableau ci-dessous présente un exemple de structure de données attendue pour les fichiers à importer. Chaque ligne correspond à une activité dont les émissions seront calculées à partir des données de consommation et du facteur d'émission associé.

TABLE 3.2 – Exemple de structure attendue pour un fichier CSV à intégrer dans le système

Équipement	Type de carburant	Consommation (l)	Facteur d'émission (kg CO ₂ /m ³)
équipement 1	carburant 1	valeur	valeur
équipement 2	carburant 2	valeur	valeur

3.4.3 Dashboard final

Une fois toutes les catégories activées traitées, le système présente une interface de synthèse regroupant l'ensemble des résultats obtenus. Ce tableau de bord comprend :

- Une somme globale des émissions, exprimée en tonnes équivalent CO₂ agrégée sur les Scopes sélectionnés.
- Deux graphiques distincts représentant les émissions par catégorie pour le Scope 1 et le Scope 3. Ces représentations visuelles facilitent l'identification des postes les plus émetteurs.
- Une section dédiée aux recommandations, présentant les leviers de réduction associés aux postes d'émissions dominants. Ces leviers sont préconfigurés dans le code source de l'application, sur la base d'une analyse manuelle préalable. Leur affichage est conditionné par les résultats du calcul.

Ce parcours structuré permet d'aboutir à une évaluation claire, modulable et interprétable des émissions de gaz à effet de serre d'une organisation à partir de ses données opérationnelles.

3.5 Logique de calcul

Le système repose sur une architecture orientée données, dans laquelle chaque table importée est traitée à travers une série de modules logiques répartis entre la base de données, le back-end Django et l'interface utilisateur. La logique de calcul des émissions et la gestion des facteurs d'émission sont encadrées par un modèle structurant appelé TableType, qui définit pour chaque catégorie si la table est de type input, calculation, output ou reference.

Lors de l'importation d'un fichier CSV par l'utilisateur, le système identifie d'abord la catégorie d'émissions concernée, puis associe dynamiquement une structure attendue de table. Le fichier est ensuite analysé ligne par ligne : chaque ligne représente une activité ou une dépense, à laquelle l'utilisateur doit associer manuellement un facteur d'émission approprié. Ce facteur est renseigné soit directement dans le fichier CSV, soit injecté via l'interface, selon la structure du modèle.

La formule de base utilisée pour le calcul est la suivante :

$$\text{Émissions (kg CO}_2\text{e)} = \text{Donnée d'activité} \times \text{Facteur d'émission} \quad (3.1)$$

Ce calcul est réalisé sur chaque ligne du tableau importé. Les émissions sont ensuite agrégées automatiquement par catégorie, puis regroupées par périmètre (Scope 1, 2 ou 3), et stockées dans la base de données PostgreSQL.

La logique est suffisamment modulaire pour permettre la réutilisation du même schéma sur différentes catégories : par exemple, que la donnée soit exprimée en litres, en kWh ou en euros, le système applique la même formule, à condition que le facteur d'émission soit cohérent en unité. Une vérification de structure via des schémas JSON est également en place, afin de garantir la compatibilité et la complétude des fichiers avant traitement.

Le back-end, implémenté avec le framework Django, exécute ces calculs à la demande, à l'aide d'une application programming interface (API) intermédiaire entre l'interface React (front-end) et la base PostgreSQL. Cela permet d'afficher instantanément à l'utilisateur les émissions calculées pour chaque catégorie, tout en conservant l'historique des résultats.

Bien que les facteurs d'émission ne soient pas encore reliés à une base dynamique, la structure actuelle est pensée pour permettre une extension en ce sens. Il suffira d'ajouter un module de correspondance automatique entre le type d'activité détecté et le facteur approprié, pour rendre le système plus autonome dans le traitement et la fiabilisation des données environnementales. La figure suivante illustre la logique de calcul appliquée par le système, depuis l'importation des données brutes jusqu'à l'agrégation finale des émissions par catégorie et par Scope.

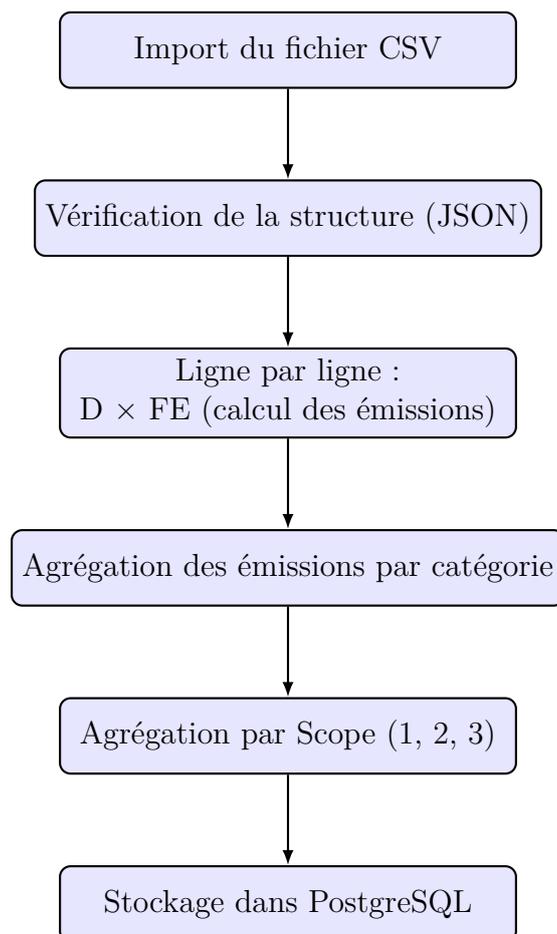


FIGURE 3.3 – Schéma de la logique de calcul des émissions dans le système.

3.5.1 Algorithme 1 – Traitement des données d’entrée par catégorie

Algorithm 1 Traitement des données pour une catégorie d’émissions

Require: Fichier CSV importé par l’utilisateur

Ensure: Total des émissions pour la catégorie (en kg CO₂e)

- 1: Vérifier la conformité du fichier (colonnes, types, unités)
 - 2: **for all** ligne dans le fichier CSV **do**
 - 3: Extraire la donnée d’activité D
 - 4: Extraire ou associer le facteur d’émission FE
 - 5: Calculer les émissions : $E = D \times FE$
 - 6: Ajouter E au total de la catégorie
 - 7: **end for**
 - 8: Enregistrer le total de la catégorie
 - 9: Afficher le résultat à l’utilisateur
-

3.5.2 Algorithme 2 – Agrégation des émissions par Scope

Algorithm 2 Agrégation des émissions par périmètre

Require: Émissions calculées par catégorie

Ensure: Émissions totales par Scope

- 1: Initialiser : $S_1 = 0, S_2 = 0, S_3 = 0$
 - 2: **for all** catégorie C **do**
 - 3: Identifier le Scope associé à C
 - 4: Ajouter les émissions de C au total du Scope correspondant
 - 5: **end for**
 - 6: Stocker S_1, S_2, S_3 dans la base de données
 - 7: Afficher les résultats dans le tableau de bord
-

3.5.3 Algorithme 3 – Affichage conditionnel des leviers de réduction

Algorithm 3 Affichage des recommandations en fonction des résultats

Require: Émissions par catégorie

Ensure: Liste des leviers de réduction affichés

- 1: **for all** catégorie C **do**
 - 2: **if** émissions de $C >$ seuil défini **then**
 - 3: Activer l’affichage du levier associé à C
 - 4: **end if**
 - 5: **end for**
 - 6: Regrouper tous les leviers activés
 - 7: Transmettre la liste au front-end
-

3.6 Intégration des leviers de réduction

À l'issue du calcul des émissions pour les différentes catégories sélectionnées, le système propose une série de leviers de réduction présentés sous forme de recommandations contextualisées. Ces recommandations ont pour but de sensibiliser l'utilisateur aux actions potentielles permettant de réduire les postes les plus émetteurs identifiés.

La logique d'intégration des leviers repose sur une analyse préalable des résultats du calcul. Cette étape est réalisée manuellement par le développeur qui examine les émissions séparées par catégorie afin d'identifier les contributions dominantes. Les postes d'émissions les plus significatifs, qu'ils relèvent du Scope 1, 2 ou 3 sont alors associés à un ou plusieurs leviers pertinents, choisis en fonction de leur nature et des bonnes pratiques existantes. Par exemple, un poste important d'émissions lié à la consommation de carburant peut être associé à un levier tel que le renouvellement de la flotte de véhicules ou l'éco-conduite.

L'intégration des leviers dans le système n'est pas automatisée à ce stade. Elle se fait directement dans le code source de l'interface utilisateur. Cette logique permet d'adapter partiellement les recommandations aux résultats obtenus, sans recourir à une intelligence artificielle ni à une base de correspondance dynamique.

Les leviers apparaissent dans le tableau de bord final, à la suite des graphiques présentant les émissions détaillées. Ils sont présentés sous forme de blocs textuels synthétiques, formulant une action préconisée ou une orientation possible. Leur objectif est de renforcer la dimension décisionnelle du système, en mettant en relation les diagnostics d'émissions et les options d'atténuation envisageables. Toutefois, il convient de souligner que ces recommandations ne sont ni personnalisées ni exhaustives, et qu'elles reposent sur une démarche d'analyse statique qui pourra évoluer dans les versions ultérieures du système.

TABLE 3.3 – Structure type d'un tableau de priorisation multicritère des leviers de réduction.

Levier détaillé	Impact attendu	Faisabilité	Co-bénéfices	Priorité
Description	Élevé	Très bonne	Description	Haute
Description	Élevé	Moyenne	Description	Moyenne
Description	Modéré	Bonne	Description	Moyenne

3.7 Limites de la version actuelle et perspectives d'évolution

La version actuelle du système digitalisé constitue une base fonctionnelle satisfaisante pour le calcul semi-automatisé des émissions de gaz à effet de serre mais elle présente certaines limites qu'il convient de reconnaître et de documenter. Ces limitations ne compromettent pas la validité des résultats obtenus, mais elles restreignent l'autonomie des utilisateurs et les possibilités de personnalisation.

La première limitation majeure réside dans le caractère manuel de l'intégration des facteurs d'émission. Le système ne dispose pas, à ce stade, d'une base interne ou connectée permettant de charger automatiquement les coefficients adaptés à chaque activité. L'utilisateur (ou le développeur) doit donc saisir manuellement les valeurs de facteurs au moment du traitement, ce

qui exige une bonne compréhension des sources et des unités, ainsi qu'une vigilance sur leur adéquation aux données d'entrée.

La deuxième limite concerne l'origine des recommandations proposées. Les leviers de réduction sont codés de manière statique dans l'interface, en fonction d'une analyse préalable des résultats, et non générés dynamiquement. Cela empêche une adaptation fine aux spécificités contextuelles de l'organisation ou à l'évolution des données dans le temps. De plus, l'absence d'une base de leviers paramétrable ou enrichissable réduit la portée décisionnelle du système.

Sur le plan fonctionnel, le système n'intègre pas encore de modules d'authentification, de gestion multi-utilisateurs, ni d'historique des traitements réalisés. Il ne permet pas non plus l'export automatique des résultats sous forme de rapports (PDF ou Excel), ni la simulation de scénarios alternatifs en fonction de l'activation ou non de certains leviers.

Enfin, l'interface, bien qu'opérationnelle, reste dépendante de la saisie correcte des fichiers par l'utilisateur, sans contrôle automatique de la qualité ou de la complétude des données. Aucun module de validation avancée n'est pour l'instant mis en œuvre.

En dépit de ces limites, le système repose sur une architecture robuste et modulaire, qui constitue une base solide pour des améliorations futures. Plusieurs pistes d'évolution sont envisagées afin d'enrichir les fonctionnalités et d'accroître l'autonomie de l'utilisateur. Tout d'abord, l'intégration d'un module intelligent de traitement des fichiers, basé sur des techniques de classification supervisée ou de reconnaissance de motifs, permettrait d'attribuer automatiquement le facteur d'émission adéquat à chaque ligne de données, en fonction du type d'activité détecté. En complément, un moteur de recommandation basé sur des règles expertes ou sur des modèles d'apprentissage pourrait analyser les résultats d'émissions obtenus et proposer dynamiquement des leviers de réduction contextualisés, en fonction des postes d'émissions dominants.

D'autres perspectives incluent la mise en place d'un module d'authentification sécurisé pour une gestion multi-utilisateurs, l'historisation automatique des traitements réalisés, l'export structuré des résultats sous forme de rapports personnalisables (PDF, Excel), ainsi que l'ajout d'un simulateur de scénarios permettant d'estimer l'impact potentiel de l'activation de certains leviers. L'interfaçage avec des systèmes d'information environnementaux existants ou des ERP métiers constitue également une piste pertinente pour inscrire l'outil dans un écosystème numérique opérationnel. À terme, ces évolutions visent à faire de ce prototype un système complet, adaptable et interopérable.

TABLE 3.4 – Limites identifiées du système actuel et perspectives d'évolution envisagées.

Limite actuelle	Impact sur l'utilisateur	Perspective d'évolution
Facteurs d'émission saisis manuellement	Risque d'erreur, lourdeur de saisie	Intégration d'une base dynamique connectée ou interne
Recommandations statiques codées en dur	Faible personnalisation, rigidité	Génération dynamique via moteur de règles ou IA simple
Pas de gestion multi-utilisateurs	Usage limité à un seul opérateur	Ajout d'un module d'authentification et gestion des droits
Pas d'export de rapports (PDF, Excel)	Pas de traçabilité des résultats	Génération automatique de rapports personnalisables
Pas de simulateur de scénarios	Impossibilité de tester des hypothèses de réduction	Ajout d'un module de simulation et projection
Pas de contrôle avancé de qualité des données	Dépendance à la saisie correcte par l'utilisateur	Intégration d'un module de validation structurée et alertes

3.8 Conclusion

Le développement du système digitalisé présenté dans ce chapitre constitue une réponse concrète aux besoins d'évaluation environnementale fondés sur le cadre du GHG Protocol. Construit autour d'une architecture web modulaire il permet de traiter des données d'activité réelles, d'appliquer des facteurs d'émission contextuels, et de restituer les résultats de manière synthétique et interprétable.

Bien que la version actuelle reste volontairement limitée dans certaines fonctionnalités, notamment l'intégration manuelle des facteurs d'émission et l'absence de génération dynamique des leviers, elle offre une base fonctionnelle robuste et cohérente, adaptée à un usage interne en phase de prototypage. L'outil démontre ainsi la faisabilité d'une digitalisation progressive du calcul des émissions de gaz à effet de serre, en conciliant rigueur méthodologique et accessibilité technique.

Les limites identifiées et les pistes d'amélioration évoquées ouvrent la voie à une évolution future du système vers davantage d'automatisation, de personnalisation et d'interopérabilité, avec pour objectif final de proposer une solution complète, évolutive et adaptée aux besoins des acteurs engagés dans la transition bas-carbone.

Chapitre 4

Application du Système à un Cas Réel : Siemens Energy

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre concrète du système développé dans le cadre de ce travail à travers son application à un site opérationnel réel. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure l'outil permet de réaliser un inventaire des émissions de gaz à effet de serre fidèle, structuré et conforme aux exigences méthodologiques reconnues.

Le centre de service Hammadi de Siemens Energy, spécialisé dans les activités de maintenance et de réparation, a été retenu comme terrain d'expérimentation. L'analyse couvre la période de février à décembre 2024. À partir des données disponibles et selon les méthodes de calcul appropriées, les émissions sont estimées par poste, puis interprétées à la lumière des résultats.

Cette application permet également de proposer des pistes de réduction adaptées au profil du site, et d'évaluer les apports et les limites du système dans un contexte professionnel réel.

4.2 Périmètre de l'étude et cadre temporel

L'application du système digitalisé d'évaluation des émissions de GES a été réalisée sur un cas réel : le **centre de service Hammadi de Siemens Energy**. Ce centre, situé dans la commune de Hammadi (wilaya de Boumerdès), constitue l'une des principales entités opérationnelles de Siemens Energy en Algérie, avec une activité centrée exclusivement sur la maintenance et la réparation d'équipements énergétiques.

Le choix de ce périmètre repose sur plusieurs considérations. D'une part, il s'agit d'un site représentatif des opérations courantes de Siemens Energy au niveau local, permettant de tester la robustesse et l'adaptabilité du système dans un contexte industriel réel. D'autre part, l'activité du centre est suffisamment structurée pour permettre une évaluation rigoureuse des émissions, tout en présentant une diversité de sources (énergie, déplacements, approvisionnements, etc.) pertinentes pour l'analyse.

La période de déclaration considérée pour cette évaluation s'étend de février à décembre 2024. Le mois de janvier a été exclu car Siemens Energy été affilié à Siemens S.p.a et le choix de décembre comme date de clôture permet de couvrir un cycle opérationnel complet, représentatif

de l'activité annuelle du centre. L'ensemble des résultats présentés dans les sections suivantes concerne exclusivement cette période de référence.



FIGURE 4.1 – Façade du centre de service Hammadi – Siemens Energy

4.3 Catégories d'émissions retenues et méthode de calcul appliquées

Dans le cadre de cette étude appliquée, l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre du centre de service Hammadi repose sur la méthodologie du GHG Protocol, en couvrant les trois périmètres d'émissions (Scopes 1, 2 et 3), selon une sélection ciblée des catégories pertinentes au regard des activités du site.

Le système développé a été configuré pour prendre en compte les catégories suivantes :

- **Scope 1 – Émissions directes :**
 - o Combustion stationnaire
 - o Combustion mobile
 - o Émissions fugitives
- **Scope 2 – Émissions indirectes liées à l'énergie :**
- **Scope 3 – Émissions indirectes de la chaîne de valeur (amont uniquement) :**
 - o Biens et services achetés
 - o Biens d'équipements
 - o Activités liées aux carburants et à l'énergie (non incluses dans les Scopes 1 ou 2)
 - o Transport et distribution en amont
 - o Déchets générés lors des opérations
 - o Déplacements professionnels
 - o Trajets domicile-travail des employés

Les catégories 8 à 15 du Scope 3 ont été exclues de l'analyse, car jugées non applicables aux activités réelles du centre de service Hammadi. En effet, ce dernier ne possède ni biens loués, ni activités aval, ni système de franchises ou d'investissements financiers. Cette exclusion repose sur l'analyse des flux opérationnels réels et sur la non-pertinence méthodologique de ces postes dans le contexte étudié.

L'évaluation des émissions de gaz à effet de serre a été réalisée conformément aux recommandations méthodologiques du GHG Protocol, en mobilisant deux types de méthodes selon la nature et la disponibilité des données : la méthode activity-based (fondée sur les quantités physiques) et la méthode spend-based (fondée sur les données financières). La méthode appliquée à chaque catégorie est décrite ci-après :

- **Combustion stationnaire (Scope 1)** : méthode **activity-based**, fondée sur la quantité de carburant consommée (en litres), multipliée par un facteur d'émission exprimé en kg CO₂e par litre.
- **Combustion mobile (Scope 1)** : méthode **activity-based**, basée sur les volumes de carburant utilisés par les véhicules de service. Les émissions sont calculées en appliquant un facteur d'émission par litre, incluant le CO₂, CH₄ et N₂O convertis en équivalent CO₂.
- **Émissions fugitives (Scope 1)** : méthode **activity-based**, fondée sur les taux de fuites potentiels par type d'équipement. Le calcul repose sur les potentiels de réchauffement global PRG des gaz concernés.
- **Énergie achetée (Scope 2)** : méthode **location-based**, utilisant la consommation électrique annuelle du centre (en kWh), multipliée par un facteur d'émission moyen du réseau électrique national (kg CO₂e/kWh).
- **Biens et services achetés (Scope 3 – catégorie 1)** : méthode **spend-based**, basée sur les montants financiers des achats par catégorie. Chaque poste est associé à un facteur d'émission monétaire exprimé en kg CO₂e par euro converti.
- **Biens d'équipements (Scope 3 – catégorie 2)** : méthode **spend-based**, fondée sur les montants d'investissement dans les équipements techniques et mobiliers. Les facteurs d'émission utilisés tiennent compte du cycle de vie moyen des produits (cradle-to-gate).
- **Activités liées au carburant et à l'énergie (Scope 3 – catégorie 3)** : méthode **activity-based**, appliquant les facteurs d'émission liés à la phase amont des énergies consommées en fonction des quantités de carburant ou d'électricité utilisées.
- **Transport et distribution en amont (Scope 3 – catégorie 4)** : méthode **activity-based** fondée sur la masse des produits transportés (en tonnes), la distance parcourue (en kilomètres), et le mode de transport utilisé. Les émissions sont calculées à l'aide d'un facteur d'émission exprimé en kg CO₂e par tonne.km, variant selon qu'il s'agisse d'un transport par camion, fourgon ou avion, etc.
- **Déchets générés lors des opérations (Scope 3 – catégorie 5)** : méthode **activity-based**, basée sur les masses de déchets produits, séparées par filière de traitement (recyclage, incinération, enfouissement technique, etc.). Chaque flux est associé à un facteur d'émission spécifique selon sa nature et son traitement final.
- **Déplacements professionnels (Scope 3 – catégorie 6)** : méthode **activity-based**, fondée sur les distances parcourues par mode de transport (avion, train, véhicule personnel), multipliées par les facteurs d'émission correspondants (kg CO₂e/km).
- **Trajets domicile-travail des employés (Scope 3 – catégorie 7)** : méthode **activity-based**, fondée sur une collecte de données du nombre de trajets annuels, des distances moyennes et des modes de transport utilisés. Les calculs ont été réalisés en appliquant les facteurs d'émission par km et par mode.

Toutes les valeurs utilisées comme facteurs d'émission sont issues de sources fiables et ont été sélectionnées en cohérence avec le contexte algérien et les hypothèses réalistes du centre de service Hammadi. Aucune donnée brute ou confidentielle relative aux activités du centre n'est exposée dans ce qui suit.

4.4 Résultats des émissions par scope et par catégorie

La présente section synthétise les résultats obtenus à partir de l'application du système d'évaluation au centre de service Hammadi. Tous les résultats sont exprimés en kg CO₂e. Chaque poste est accompagné du FE utilisé, cité selon sa source officielle.

Scope 1 : Émissions directes

- **Combustion stationnaire** : 2272 kg CO₂e
FE utilisé : 2,698 kg CO₂e/litre de gasoil [22]
- **Combustion mobile** : 1721 kg CO₂e
FE utilisé : 2,698 kg CO₂e/litre de gasoil, 2,68 kg CO₂e/litre de kérosène [23].
- **Émissions fugitives** : 3332 kg CO₂e
FE utilisé : PRG du fluide R-410A = 2255,5 selon les valeurs de PRG actualisées [5],
Taux de fuite estimé sur la base des guides EPA [37, 38]

Total Scope 1 : 7325 kg CO₂e



FIGURE 4.2 – Résultats d'émissions directes – Scope 1 (extrait du dashboard du système)

Scope 2 : Émissions indirectes liées à l'énergie

Énergie achetée : 260884 kg CO₂e
FE utilisé : 0,528 kg CO₂e/kWh [39]

Total Scope 2 : 260884,45 kg CO₂e

Scope 3 : Émissions indirectes de la chaîne de valeur

- **Biens et services achetés** : 112696 kg CO₂e
FE utilisé : facteur monétaire moyen en kg CO₂e/€, issu de [40]
- **Biens d'équipements** : 2030006 kg CO₂e
FE utilisé : facteur monétaire moyen en kg CO₂e/€, également extrait de [40]

- **Activités liées au carburant et à l'énergie** : 734001 kg CO₂e
FE utilisé : émissions amont associées à la production de carburants selon [41]
- **Transport et distribution en amont** : 6874 kg CO₂e
FE utilisé : facteur par tonne.km selon le mode de transport [42]
- **Déchets générés lors des opérations** : 54 kg CO₂e
FE utilisé : selon le type de déchet et filière de traitement (décharge, recyclage, etc.) [43]
- **Déplacements professionnels** : 784 kg CO₂e
FE utilisé : facteur d'émission moyen par km selon le mode de transport [44, 45]
- **Trajets domicile-travail des employés** : 12628 kg CO₂e
FE utilisé : basé sur la consommation spécifique des véhicules utilisés à partir de fiches techniques [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]

Total Scope 3 (amont) : 2236442 kg CO₂e

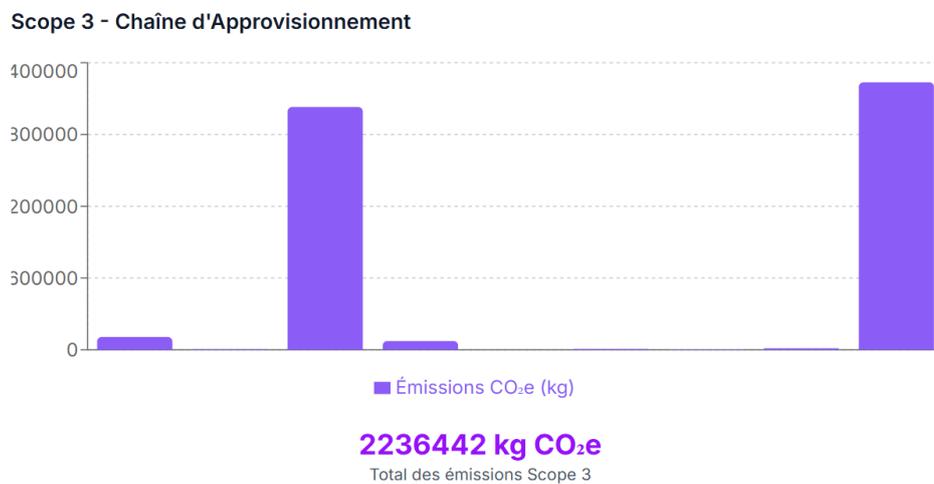


FIGURE 4.3 – Émissions de la chaîne de valeur – Scope 3 (extrait du dashboard du système)

4.5 Analyse critique des résultats et leviers de réduction proposés

L'analyse des émissions de gaz à effet de serre calculées pour le centre de service Hammadi met en évidence une répartition hétérogène des sources d'impact selon les scopes. Cette diversité appelle des approches de réduction différenciées, tenant compte à la fois des volumes émis, de la maîtrise possible sur les postes concernés, et de la faisabilité concrète des actions envisagées.

Émissions du Scope 1

Le Scope 1 regroupe les émissions directes issues de la combustion stationnaire (groupes électrogènes), de la combustion mobile (véhicules utilitaires et chariots de manutention), ainsi que des émissions fugitives liées aux fluides frigorigènes.

Parmi ces postes, ce sont les émissions fugitives qui se sont révélées les plus significatives. Elles proviennent principalement de l'usage de climatiseurs contenant du fluide R-410A, dont le potentiel de réchauffement global est élevé. Deux leviers majeurs ont été identifiés : la mise

en place d'un registre de suivi des fuites, et le remplacement progressif des équipements par des systèmes utilisant des fluides moins impactants, tels que le R-32.

Pour la combustion stationnaire, la substitution des groupes électrogènes par des équipements plus récents ou hybrides permettrait de réduire l'intensité carbone et d'améliorer l'efficacité énergétique, bien que la faisabilité immédiate soit limitée par des contraintes d'investissement.

Enfin, la combustion mobile générée par les chariots à moteur thermique pourrait être atténuée par le passage à des modèles électriques, ce qui offrirait en parallèle des gains en bruit, en entretien et en autonomie. À titre illustratif, le tableau suivant présente les principaux leviers de réduction identifiés pour le Scope 1, en précisant leur impact attendu, leur faisabilité et les co-bénéfices associés :

TABLE 4.1 – Leviers de réduction proposés pour le Scope 1

Levier détaillé	Impact attendu	Faisabilité	Co-bénéfices associés	Priorité
Mettre en place un registre officiel des équipements et des fuites de fluides	Élevé	Très bonne	Conformité réglementaire (fluorés), meilleure détection	Haute
Remplacer progressivement les climatiseurs R410A par des modèles R32	Élevé	Moyenne	Réduction durable des émissions + amélioration énergétique	Moyenne
Réduire le fonctionnement inutile ou à vide du groupe électrogène	Modéré	Bonne	Économie de carburant, réduction bruit et usure moteur	Moyenne
Substituer à long terme le groupe électrogène diesel par un système hybride ou autonome	Fort (à long terme)	Faible à court terme	Autonomie énergétique, réduction sonore, durabilité	Long terme
Remplacer le chariot élévateur diesel par un modèle électrique	Moyen à fort	Moyenne	Réduction bruit, moins d'entretien moteur, image verte	Moyenne
Mettre en place un carnet de suivi de la consommation de gasoil	Faible à modéré	Très bonne	Amélioration du pilotage énergétique, prise de conscience des usages	Haute

Émissions du Scope 2

Les émissions du Scope 2, liées à la consommation d'électricité achetée, représentent le poste le plus émetteur du centre, en raison du facteur d'émission relativement élevé du réseau algérien et de la dépendance opérationnelle à l'énergie électrique.

Les leviers proposés relèvent principalement de la sobriété énergétique et de l'optimisation technique. Cela inclut :

- l'extinction automatique des équipements hors usage,
- la généralisation des éclairages LED à haute efficacité,
- la maintenance préventive des appareils électromécaniques.

Ces mesures présentent l'avantage d'être à la fois techniquement faisables, peu coûteuses à mettre en œuvre, et génératrices d'économies directes. En complément, le tableau suivant recense les leviers identifiés pour le Scope 2, principalement centrés sur la réduction de la consommation électrique et l'amélioration de l'efficacité énergétique du site :

TABLE 4.2 – Leviers de réduction proposés pour le Scope 2

Levier détaillé	Impact attendu sur les émissions	Faisabilité technique/économique	Co-bénéfices associés	Priorité
Réaliser un diagnostic énergétique des locaux	Modéré à élevé selon le résultat du diagnostic	Bonne – nécessite un prestataire ou outil simple	Réduction des coûts, meilleur confort thermique	Moyenne
Optimiser l'usage des équipements énergivores (extinctions automatiques, mise en veille)	Faible à modéré – ajustement de comportement	Très bonne – pas ou peu de coût	Sobriété, durabilité des équipements	Haute
Remplacer les luminaires existants par des LED performantes	Modéré – gain immédiat sur éclairage	Moyenne – dépend de l'existant et du budget	Réduction facture + meilleure qualité lumineuse	Moyenne
Intégrer une part d'énergie renouvelable (panneaux solaires)	Moyen à fort – réduction directe du Scope 2 à long terme	Faible à court terme – investissement initial	Image écoresponsable + autonomie partielle	Long terme
Sensibiliser le personnel à l'efficacité énergétique au quotidien	Faible – effet cumulatif si régulier	Excellente – immédiate et gratuite	Mobilisation interne, responsabilisation	Haute

Émissions du Scope 3

Le Scope 3 (amont) regroupe des postes plus diffus mais non négligeables, notamment les biens et services achetés, les déplacements professionnels et les trajets domicile-travail des employés.

Concernant les achats, plusieurs leviers organisationnels ont été proposés, comme la réduction des volumes non essentiels ou la priorisation de fournisseurs locaux ou écoresponsables. Ces leviers nécessitent une sensibilisation des acheteurs et une évolution des pratiques internes.

Pour les déplacements professionnels, le recours à des moyens de transport à faible intensité carbone (train, véhicules partagés ou hybrides) constitue un levier significatif. Il en va de même pour les trajets domicile-travail, où des incitations au covoiturage ou à l'usage de transports collectifs peuvent être envisagées, notamment dans les zones périurbaines.

Enfin, en matière de gestion des déchets, la mise en place d'un tri sélectif structuré et le recours à des filières de recyclage adaptées contribueraient à réduire les émissions tout en améliorant la conformité réglementaire du centre. Enfin, les leviers ci-dessous ciblent les émissions du Scope

3 amont. Ils concernent à la fois les pratiques d'achat, la mobilité professionnelle, la logistique, ainsi que les habitudes des employés :

TABLE 4.3 – Leviers de réduction proposés pour le Scope 3

Catégorie	Levier détaillé	Impact attendu	Co-bénéfices associés	Priorité
Biens et services achetés	Travailler avec des fournisseurs engagés dans des démarches bas carbone	Élevé	Réduction des coûts, résilience fournisseurs, image verte	Haute
Biens d'équipements	Intégrer des critères d'éco-conception et d'analyse de cycle de vie dans les appels d'offres	Très élevé	Réduction des coûts d'usage, conformité future aux exigences européennes	Très haute
Transport et distribution en amont	Évaluer l'empreinte carbone des fournisseurs logistiques et sélectionner les moins émetteurs	Faible à modéré	Moins de stress transport, baisse des coûts logistiques	Moyenne
Déplacements professionnels	Remplacer les missions par des visioconférences quand c'est possible	Modéré	Moins de fatigue, meilleure organisation, réduction des frais	Haute
Trajets domicile-travail des employés	Encourager activement le covoiturage via incitations ou organisation interne	Modéré	Motivation des salariés, baisse de l'absentéisme	Haute

Dans l'ensemble, les leviers identifiés permettent de dégager des marges de réduction crédibles, sans rupture majeure, en s'appuyant sur des actions techniques, comportementales et organisationnelles. Leur mise en œuvre progressive offrirait au centre de service Hammadi non seulement une réduction de son empreinte carbone, mais également des bénéfices secondaires en termes de coût, d'image et d'efficacité opérationnelle.

4.6 Évaluation de la pertinence du système développé

L'expérimentation du système digitalisé sur le centre de service Hammadi a permis d'en évaluer la pertinence opérationnelle, aussi bien sur le plan méthodologique que décisionnel. Cette section propose une analyse critique de ses apports concrets, de sa capacité à accompagner la démarche environnementale ainsi que des limites observées en situation réelle.

Utilité et valeur ajoutée du système

Le système a démontré une utilité immédiate dans la structuration et l'automatisation du processus de calcul des émissions GES. En particulier :

- Il centralise l'ensemble des facteurs d'émission nécessaires, classés par scope et par catégorie, et permet leur application directe sans re-saisie manuelle.
- L'interface de gestion des fichiers facilite l'import des données issues de tableaux d'activité (type CSV), en assurant la cohérence du format attendu pour chaque catégorie.
- Les résultats sont présentés de manière claire, consolidée par scope et par catégorie, ce qui permet une lecture rapide des postes émetteurs prioritaires.

Ce fonctionnement modulaire et semi-automatisé en fait un outil adapté à des utilisateurs non spécialistes, tout en assurant un traitement conforme aux exigences du GHG Protocol.

Capacité à appuyer la décision environnementale

Le système ne se limite pas à une fonction de reporting, il constitue un véritable outil d'aide à la décision pour les responsables techniques, les référents RSE ou les gestionnaires de site.

- Il permet d'identifier rapidement les postes les plus émetteurs et de cibler les efforts de réduction en conséquence.
- Grâce à sa structuration par catégories du GHG Protocol, il s'intègre naturellement aux exigences réglementaires et normatives, et peut être utilisé comme support de justification dans un audit environnemental.
- Il permet également de simuler l'effet de certains leviers de réduction, en réinjectant des données modifiées ou en dupliquant des scénarios, ce qui renforce son rôle dans la planification environnementale.

En résumé, l'outil facilite la mise en cohérence des objectifs de réduction avec les réalités de terrain, et offre une vision consolidée des émissions, indispensable à toute stratégie climat sérieuse.

Limites observées lors de l'expérimentation

Bien que globalement fonctionnel, le système a révélé certaines limites dans sa première version, notamment :

- La saisie ou l'import de données nécessite une validation manuelle rigoureuse, notamment dans l'association des lignes d'activité à un facteur d'émission pertinent. Cette étape reste sujette à des erreurs de correspondance.
- Certaines catégories du Scope 3, bien qu'intégrées, restent difficilement exploitables dans le contexte d'un centre de service.
- La gestion des unités et conversions (km, L, kg, €) suppose une vigilance constante de l'utilisateur, bien que le système alerte en cas d'incohérence manifeste.

Ces limites n'enlèvent rien à la valeur du système dans son ensemble, mais elles invitent à considérer son usage dans une logique de complémentarité avec l'expertise humaine et le contrôle qualité.

4.7 Conclusion

L'application du système digitalisé au centre de service Hammadi a permis de confirmer sa capacité à produire un inventaire structuré et fiable des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats obtenus ont mis en évidence les postes les plus émetteurs, en particulier l'électricité consommée, les achats de biens et services, ainsi que les biens d'équipements. Ces éléments ont servi de base pour formuler des leviers de réduction concrets, tenant compte des spécificités techniques et organisationnelles du site.

Au-delà des résultats quantitatifs, l'expérimentation a également permis de tester l'ergonomie du système, sa compatibilité avec les données réelles d'exploitation, ainsi que sa valeur en tant qu'outil d'aide à la décision. L'évaluation menée montre que l'outil constitue un support pertinent pour structurer une démarche climat à l'échelle d'un site industriel. Il contribue à renforcer la lisibilité des enjeux et facilite l'engagement vers des actions de réduction adaptées et priorisées.

Chapitre 5

Valorisation et Modèle Économique

5.1 Introduction

Après avoir présenté le fonctionnement du système TraceLess, sa mise en œuvre technique et les résultats obtenus au sein d'un contexte réel, ce chapitre se consacre à l'analyse de sa viabilité économique et de son potentiel de développement à long terme. Il s'agit d'évaluer non seulement la valeur ajoutée apportée par la solution dans le contexte actuel de transition écologique, mais aussi les conditions de son déploiement à plus grande échelle.

Cette étude s'articule autour de trois axes : la valorisation de la solution et de son positionnement sur le marché émergent des outils de comptabilité carbone, la stratégie de différenciation adoptée face aux solutions concurrentes, et enfin, l'élaboration d'un modèle économique cohérent et évolutif, structuré selon les principes du Business Model Canvas. Ce chapitre vise ainsi à démontrer que TraceLess constitue une solution non seulement fonctionnelle, mais également économiquement soutenable et stratégiquement bien positionnée.

5.2 Valorisation de la solution TraceLess

Le développement du système présenté dans ce travail s'est concrétisé sous la forme d'un site web fonctionnel baptisé **TraceLess**. Cette solution a pour vocation de répondre aux besoins croissants des structures publiques et privées en matière de quantification et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Elle s'inscrit dans une démarche de transition écologique accessible, structurée et actionnable.

TraceLess se distingue par une approche orientée utilisateur, combinant automatisation des calculs, intégration des facteurs d'émission reconnus, visualisation simplifiée des résultats et génération d'analyses exploitables. Le système repose sur une logique modulaire, interopérable avec des données d'activité standards (CSV), ce qui en fait un outil flexible, adapté à une variété de contextes opérationnels.

Le projet a fait l'objet d'une première expérimentation réussie au sein du centre de service Hammadi de Siemens Energy démontrant sa capacité à s'intégrer à un environnement réel, à produire un inventaire conforme aux standards internationaux (GHG Protocol), et à orienter des actions concrètes de réduction. Cette mise en situation constitue un atout fort en matière de preuve de concept.

Par ailleurs, une identité de marque a été amorcée afin de soutenir la visibilité et la cohérence de la solution. Elle se compose d'un nom distinctif (**TraceLess**), d'un slogan engageant (**Track your impact, stay on track**) et d'un logo épuré combinant une feuille et une courbe analytique, symbolisant l'alliance entre environnement et données.



FIGURE 5.1 – Identité visuelle de la solution TraceLess : logo officiel

Dans un contexte de réglementation environnementale de plus en plus contraignante, et face à la montée des exigences de reporting extra-financier (CSRD, taxonomie verte, ISO 14064), TraceLess se positionne comme une solution pertinente pour accompagner les PME industrielles, les bureaux d'étude ou les collectivités souhaitant initier ou structurer leur stratégie bas carbone. La simplicité de déploiement, la lisibilité des résultats et la capacité d'adaptation du système constituent des atouts pour une valorisation future à l'échelle nationale, puis une adaptation à l'internationale.

5.3 Positionnement stratégique de TraceLess

Le développement d'outils numériques pour le suivi environnemental connaît une dynamique croissante, alimentée par la multiplication des exigences réglementaires, les pressions liées à la transition énergétique, et l'émergence d'une conscience écologique au sein des organisations. Dans ce paysage en évolution rapide, TraceLess se positionne de manière ciblée sur un segment encore peu adressé en Algérie et dans les pays du Sud : celui des solutions légères, accessibles et adaptables, conçues pour des structures qui débutent ou structurent leur démarche climatique.

Contrairement aux plateformes internationales souvent conçues pour des grands groupes ou des marchés matures, TraceLess privilégie une logique d'adoption progressive, sans barrière technologique ni coût d'entrée prohibitif. Ce positionnement lui permet de répondre à des contextes où les outils de comptabilité carbone sont encore peu diffusés, et où les compétences internes en matière de GES sont limitées.

La stratégie de différenciation repose ainsi non pas sur la complexité ou l'exhaustivité, mais sur la clarté d'usage, la compatibilité avec les référentiels existants, et la capacité à produire des résultats exploitables sans recourir à des expertises externes systématiques. Ce choix méthodologique permet à TraceLess de se placer comme une passerelle entre l'absence totale d'outillage et les solutions professionnelles lourdes, dans un marché où la demande évolue mais reste hétérogène.

Ce positionnement stratégique est renforcé par la capacité de la solution à s'intégrer à des

démarches existantes de pilotage environnemental (plan climat interne, démarche ISO, rapports ESG), tout en restant suffisamment souple pour accompagner des structures plus petites ou en phase de sensibilisation. Il ouvre la voie à un déploiement en partenariat avec des acteurs locaux (chambres de commerce, pôles industriels, incubateurs) dans une logique de transition territoriale soutenue et adaptée aux réalités du terrain.

5.4 Modèle économique et perspectives de développement

Afin d'assurer la viabilité et la pérennité de TraceLess au-delà du cadre académique, une réflexion a été menée sur son modèle économique. Celui-ci s'appuie sur les principes du Business Model Canvas, qui permet de visualiser de manière synthétique les composantes clés de la création de valeur, des sources de revenus et des partenariats à mobiliser.

TraceLess vise en priorité les petites et moyennes entreprises industrielles, les bureaux d'étude environnementaux, les collectivités locales et les institutions publiques souhaitant initier ou structurer une démarche de comptabilité carbone. Ces segments de clientèle sont souvent peu outillés, peu formés, mais exposés à des exigences croissantes en matière de reporting environnemental.

La proposition de valeur repose sur la simplicité d'utilisation de la plateforme, la possibilité de visualiser rapidement les postes émetteurs, et l'aide à la prise de décision. TraceLess se différencie ainsi des outils professionnels lourds par son ergonomie, sa transparence et sa capacité à être utilisé de manière autonome, même sans expertise technique avancée.

Le canal de distribution principal est le site web de la solution, complété par des actions de sensibilisation, de communication ciblée, et par d'éventuels partenariats avec des structures relais (centres techniques, agences locales, chambres de commerce). La relation client repose sur une interface fluide, un accompagnement documentaire en ligne, et un modèle de support léger mais réactif.

Plusieurs sources de revenus peuvent être envisagées selon un modèle de croissance par paliers :

- une version gratuite avec des fonctionnalités de base et un nombre limité de catégories activables,
- une offre standard payante à abonnement mensuel pour un usage complet par site,
- des services complémentaires sur demande : accompagnement à la saisie, adaptation sectorielle, édition de rapports.

Les ressources clés incluent le développement web, la maintenance des bases de facteurs d'émission, la veille réglementaire, et un service minimum de support utilisateur. Du côté des partenaires, la collaboration avec des experts climat, des structures universitaires, ou des porteurs de politiques RSE territoriales permettrait de renforcer la légitimité de l'outil et d'accélérer son déploiement.

La structure de coûts reste maîtrisée dans les premières phases : hébergement web, développement logiciel, communication ciblée. Un déploiement progressif à travers un pilote national ou régional, un partenariat public ou un appui à l'entrepreneuriat pourrait faciliter l'entrée sur le marché.

Dans un contexte où les exigences de reporting carbone se généralisent à l'échelle internationale et où l'Algérie commence à structurer ses politiques climatiques sectorielles, TraceLess bénéficie

5.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de démontrer que la solution TraceLess, au-delà de sa dimension technique, dispose d'un véritable potentiel de valorisation économique et stratégique. Grâce à un positionnement ciblé sur les structures peu outillées mais soumises à des exigences croissantes en matière de comptabilité carbone, TraceLess se distingue par sa simplicité d'usage, sa compatibilité avec les référentiels existants, et sa capacité à produire des résultats exploitables sans expertise préalable.

L'analyse du modèle économique a montré qu'un déploiement progressif et modulable, fondé sur une approche gratuite mais limitée et des partenariats territoriaux, peut garantir la viabilité du projet tout en maximisant son impact. Ainsi, TraceLess s'inscrit comme une réponse pragmatique et accessible aux enjeux de transition écologique, avec des perspectives de développement prometteuses, tant à l'échelle locale qu'internationale.

Cette étude ouvre la voie à une réflexion plus large sur les conditions d'essaimage de la solution, les leviers de financement envisageables, ainsi que les partenariats stratégiques à mobiliser pour en assurer la pérennisation.

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, il apparaît clairement que la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre constitue un enjeu central pour les entreprises industrielles, en particulier dans un contexte mondial de transition vers des modèles économiques plus sobres en carbone. La lutte contre le changement climatique impose des outils précis, rigoureux et adaptés aux réalités opérationnelles, capables de produire des bilans carbone fiables tout en facilitant l'identification de leviers d'action concrets.

Dans ce cadre, le projet mené a permis de concevoir et de développer un système digitalisé d'évaluation des émissions de CO₂ équivalent, conforme aux principes méthodologiques du GHG Protocol. L'objectif principal était double : d'une part, automatiser partiellement les calculs d'émissions à partir de données réelles, et d'autre part, proposer des recommandations de réduction adaptées aux profils d'émissions observés. Ce système repose sur une architecture modulaire, intégrant la gestion des données, le traitement algorithmique des émissions, la visualisation des résultats, ainsi qu'un moteur de suggestions de leviers, le tout via une interface web simple d'utilisation.

L'expérimentation de ce système sur le cas réel du centre de service Siemens Energy à Hammadi a permis de valider sa pertinence fonctionnelle. Les résultats ont mis en évidence des sources d'émission non négligeables dans les scopes 1, 2 et 3, et ont permis d'identifier des pistes d'amélioration à la fois techniques, organisationnelles et comportementales. Ce déploiement a également mis en lumière certaines limites, notamment l'absence d'automatisation complète, la dépendance aux bases de données d'émission manuelles, et les défis d'intégration dans des systèmes d'information existants.

Au-delà de l'aspect technique, ce projet ouvre des perspectives intéressantes en matière de valorisation et de répliquabilité. Le système développé peut être adapté à d'autres structures, en particulier des PME industrielles, souvent peu outillées pour faire face aux exigences croissantes de traçabilité environnementale. Il pourrait également s'enrichir à moyen terme de modules complémentaires : connexion à des bases de données en ligne, export automatisé de rapports, intégration dans une plateforme multi-acteurs ou extension à d'autres indicateurs de durabilité.

En définitive, ce travail montre qu'une digitalisation bien pensée de la comptabilité carbone constitue un levier puissant pour renforcer l'autonomie des entreprises face aux enjeux climatiques. Il s'agit non seulement d'un outil de mesure, mais aussi d'un support d'aide à la décision, au service d'une stratégie de transition bas carbone cohérente, progressive et adaptée au contexte local.

Bibliographie

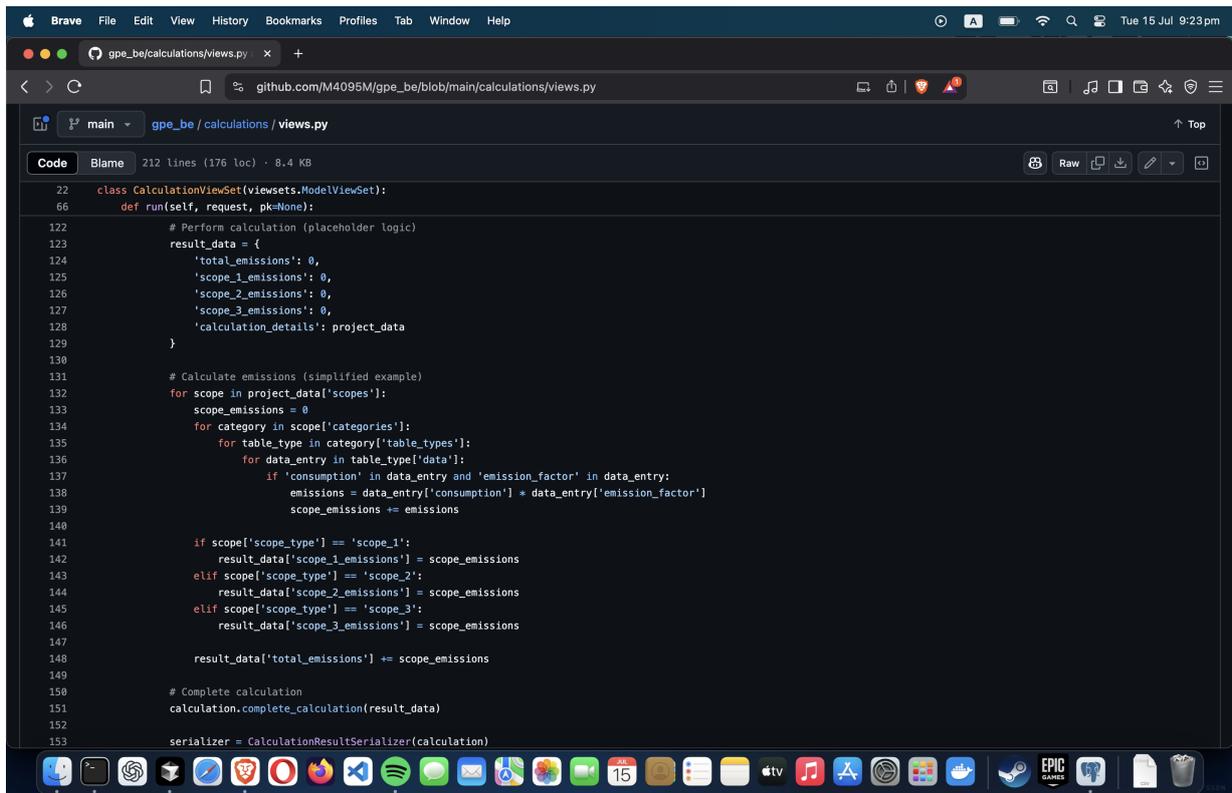
- [1] IPCC. Figure SPM.1 – Observed global warming and its attribution, 2023. In : IPCC, 2023 : Climate Change 2023 : Synthesis Report. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2] GHG Protocol. Diagram of Scopes and Emissions across the Value Chain, 2023.
- [3] Encyclopædia Britannica. How Does Earth’s Greenhouse Effect Work?, 2024. Illustration consultée dans la rubrique "Saving Earth".
- [4] United States Environmental Protection Agency. Global Greenhouse Gas Emissions by Gas, 2017.
- [5] Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values (August 2024), 2024.
- [6] GEP. Scope 3 Emissions, Its Categories Differentiating Scope 1, 2 & 3 Emissions, 2022.
- [7] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. p. 4, 10, 20–21.
- [8] Olivier Blanchard and Dani Rodrik. *Combating Climate Change: Policies and Opportunities*. CEPR Press, London, 2021. p. 17–23, 40–45.
- [9] Pankaj Bhatia and Jayant Ranganathan. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition)*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004. p. 5–10, 24–36.
- [10] Robert G. Eccles and Svetlana Klimenko. The Investor Revolution. *Harvard Business Review*, 97(3), 2019. p. 106–116.
- [11] ADEME. Référentiel pour la réalisation des bilans d’émissions de gaz à effet de serre (BEGES). Technical report, Agence de la transition écologique, France, 2022. p. 12–15, 53–55, 91–94.
- [12] Rania Djelal. Conception d’un logiciel de management du risque incendie et modélisation du feu par un modèle à zones. Mémoire de fin d’études, département qhse-gri – mrie, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Algérie, 2024. Sous la direction de Mohamed Boubakeur, M’hamed Bousbai et Badreddine Bousbai ; soutenu le 9 juillet 2024, p. 17.
- [13] Siemens Energy. Sustainability Report 2022/2023, 2023. p. 5, 7, 11.
- [14] Ioannis M. Eleftheriadis and Evangelia G. Anagnostopoulou. Carbon Footprint Calculation Tools for SMEs: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 16(5) :1905, 2024. p. 6–10.
- [15] Rafael Martínez-Peláez, Marco A. Escobar, Vanessa G. Félix, Rodolfo Ostos, Jorge Parra-Michel, Vicente García, Alberto Ochoa-Brust, Pablo Velarde-Alvarado, Ramón A. Félix, Sandra Olivares-Bautista, and Víctor Flores. Sustainable Digital Transformation for SMEs: A Comprehensive Framework for Informed Decision-Making. *Sustainability*, 16(11) :4447, 2024. p. 5–9.
- [16] NASA. Climate Change: How do greenhouse gases affect Earth’s energy balance ?, 2023.
- [17] World Resources Institute. GHG Emissions by Gas – Climate Watch (WRI), 2023.
- [18] IPCC. AR6 WG1 Chapter 7 – The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity, 2021. p. 948.

-
- [19] US Environmental Protection Agency. Overview of Greenhouse Gases, 2023. Section SF6 et N2O.
- [20] WWF. Living Planet Report 2022 – Youth Edition, 2022. p. 1–5.
- [21] GHG Protocol. GHG Protocol Guidance for Quantifying GHG Reductions from GHG Mitigation Projects, 2019. p. 2–6.
- [22] U.S. Environmental Protection Agency. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories – Stationary Combustion. Technical report, EPA, 2016. p. 1–5.
- [23] U.S. Environmental Protection Agency. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories – Mobile Combustion. Technical report, EPA, 2016. p. 1–6.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency. Fugitive Emissions Guidance, 2020. p. 3–6.
- [25] GHG Protocol. Scope 2 Guidance: accounting and reporting of purchased electricity, heat, steam and cooling, 2023. p. 6–11, 26, 45–48, 60.
- [26] GHG Protocol. Scope 3 Calculation Guidance, 2023. p. 10–45.
- [27] GHG Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Standard, 2013. p. 5–15.
- [28] Partnership for Carbon Accounting Financials. The Global GHG Accounting & Reporting Standard for the Financial Industry – Part A (Financed Emissions), 2022. 2nd edition.
- [29] Science Based Targets Initiative. SBTi Corporate Manual, 2021. p. 13–27.
- [30] ADEME. Stratégie ADEME 2025-2028 : accélération de la transition écologique des entreprises, 2025. p. 6–15.
- [31] ADEME. Numérique et environnement – Dossier de presse, 2025. p. 2–8.
- [32] Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Implementing the Recommendations of the TCFD, 2021. p. 4–6.
- [33] Bpifrance Le Lab. Décarboner les PME & ETI françaises – bilan et outils numériques. Technical report, Bpifrance Le Lab, 2023. p. 6–10.
- [34] GeeksforGeeks. Introduction to ReactJS, 2023.
- [35] Django Software Foundation. Django 5.0 Documentation, 2024.
- [36] PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 17.5 Documentation, 2025. p. 32.
- [37] U.S. Environmental Protection Agency. Stationary Refrigeration Leak Repair Requirements, 2023. consulté pour les taux de fuite standards.
- [38] U.S. Environmental Protection Agency. GHG Emissions from Fugitive Sources – Technical Guidance, 2020. p. 5–6.
- [39] ScopesData. Sustainability Country Information – Algeria 2023, 2023. Facteur location-based Algérie.
- [40] ADEME. Base Carbone complète - Version 17.0, 2023. Facteurs monétaires pour biens et services achetés et biens d'équipements.
- [41] DEFRA. 2023 UK Government GHG Conversion Factors – Methodology Paper, 2023. p. 17–20, pour les activités amont liées à l'énergie.
- [42] DEFRA. 2024 GHG Conversion Factors – Transport Methodology, 2024. p. 25–30, facteurs tonne.km.
- [43] DEFRA. Statistics on Carbon Emissions from Waste – Households in England, 2018. p. 4–10.
- [44] FlyGRN. Carbon Emission Factors Used by FlyGRN, 2023. facteurs pour transport aérien et terrestre.
- [45] Climatiq. Passenger Car (average fuel), 2023. Facteur d'émission pour voiture thermique.
- [46] AutoLexicon. How to Calculate CO Emissions, 2023. Méthode de calcul des émissions CO basée sur consommation L/100km.
- [47] Kia Corporation. Kia Picanto 2018–2019 – Petrol Model – WLTP Data, 2018. Consommation et émissions moyennes pour petit véhicule urbain.

-
- [48] Toyota Australia. Toyota Yaris 2012 – Technical Specifications (AUS), 2012. Fiche technique officielle avec données de consommation.
 - [49] Hyundai Motor Company. Hyundai i10 – 2008 MY – Technical Data, 2008. Utilisée pour estimer les émissions d’un véhicule compact.
 - [50] Suzuki. Suzuki Swift 2005 – AutoEvolution Technical Overview, 2005. Fiche en ligne avec données moteurs et consommation.
 - [51] Dacia. Dacia Duster Commercial 2022 – UK Technical Sheet, 2022. Fiche utilisée pour estimer les émissions d’un SUV léger.
 - [52] Škoda Auto. Škoda Octavia – Technical Data 2019, 2019. Consommation moyenne prise en compte dans l’analyse.
 - [53] Renault. Renault Clio 1.2 16v – 2009 – Automobile Catalog, 2009. Consommation estimée sur fiche technique catalogue.
 - [54] Hyundai UK. Hyundai Tucson – UK Technical Specifications 2020, 2020. Fiche utilisée pour SUV hybride ou thermique.
 - [55] Constructeurs automobiles (voir PDF). Fiches techniques véhicules personnels utilisés (ex. SEAT Ibiza), 2018–2022. Utilisées pour estimer la consommation moyenne réelle.

Annexes

Annexe A : Calcul des émissions dans Django



```
22 class CalculationViewSet(Viewsets.ModelViewSet):
66     def run(self, request, pk=None):
122         # Perform calculation (placeholder logic)
123         result_data = {
124             'total_emissions': 0,
125             'scope_1_emissions': 0,
126             'scope_2_emissions': 0,
127             'scope_3_emissions': 0,
128             'calculation_details': project_data
129         }
130
131         # Calculate emissions (simplified example)
132         for scope in project_data['scopes']:
133             scope_emissions = 0
134             for category in scope['categories']:
135                 for table_type in category['table_types']:
136                     for data_entry in table_type['data']:
137                         if 'consumption' in data_entry and 'emission_factor' in data_entry:
138                             emissions = data_entry['consumption'] * data_entry['emission_factor']
139                             scope_emissions += emissions
140
141             if scope['scope_type'] == 'scope_1':
142                 result_data['scope_1_emissions'] = scope_emissions
143             elif scope['scope_type'] == 'scope_2':
144                 result_data['scope_2_emissions'] = scope_emissions
145             elif scope['scope_type'] == 'scope_3':
146                 result_data['scope_3_emissions'] = scope_emissions
147
148             result_data['total_emissions'] += scope_emissions
149
150         # Complete calculation
151         calculation.complete_calculation(result_data)
152
153         serializer = CalculationResultSerializer(calculation)
```

FIGURE 0.3 – Extrait de code Python – Méthode de calcul des émissions

Annexe B : Structure de la table des scopes dans PostgreSQL

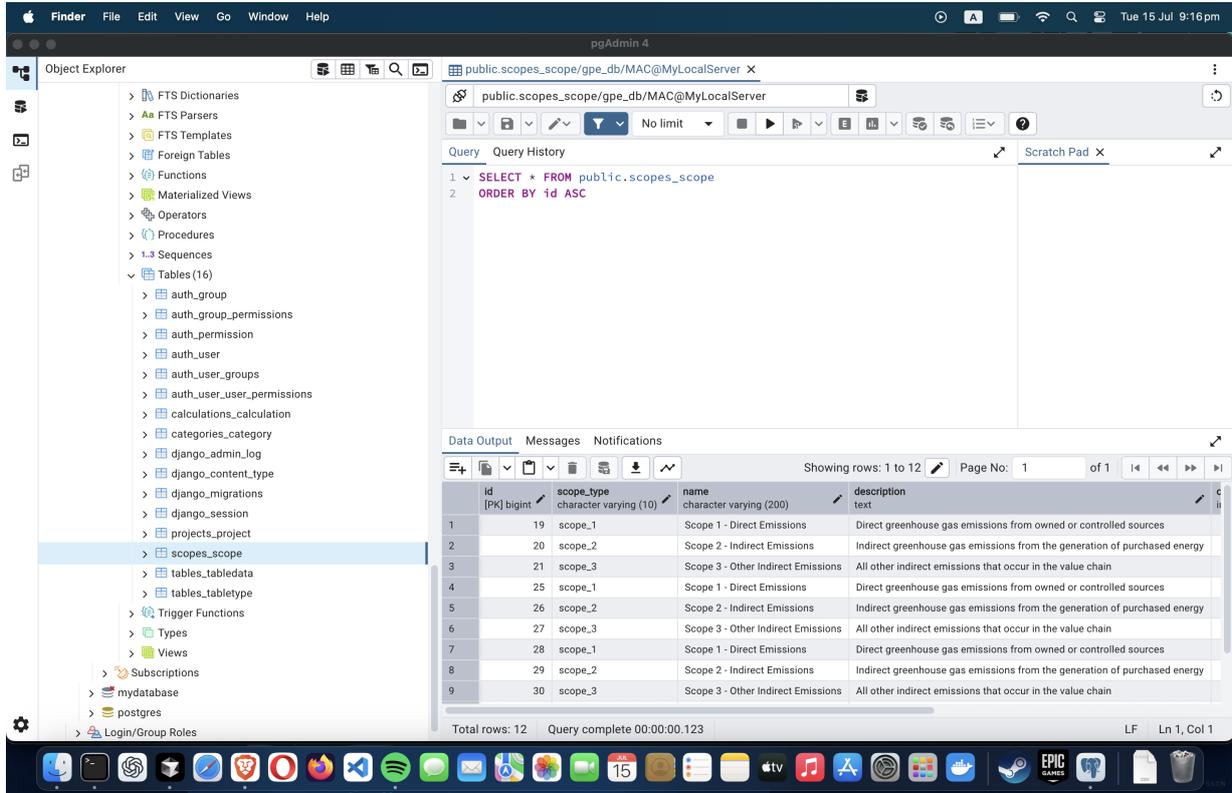
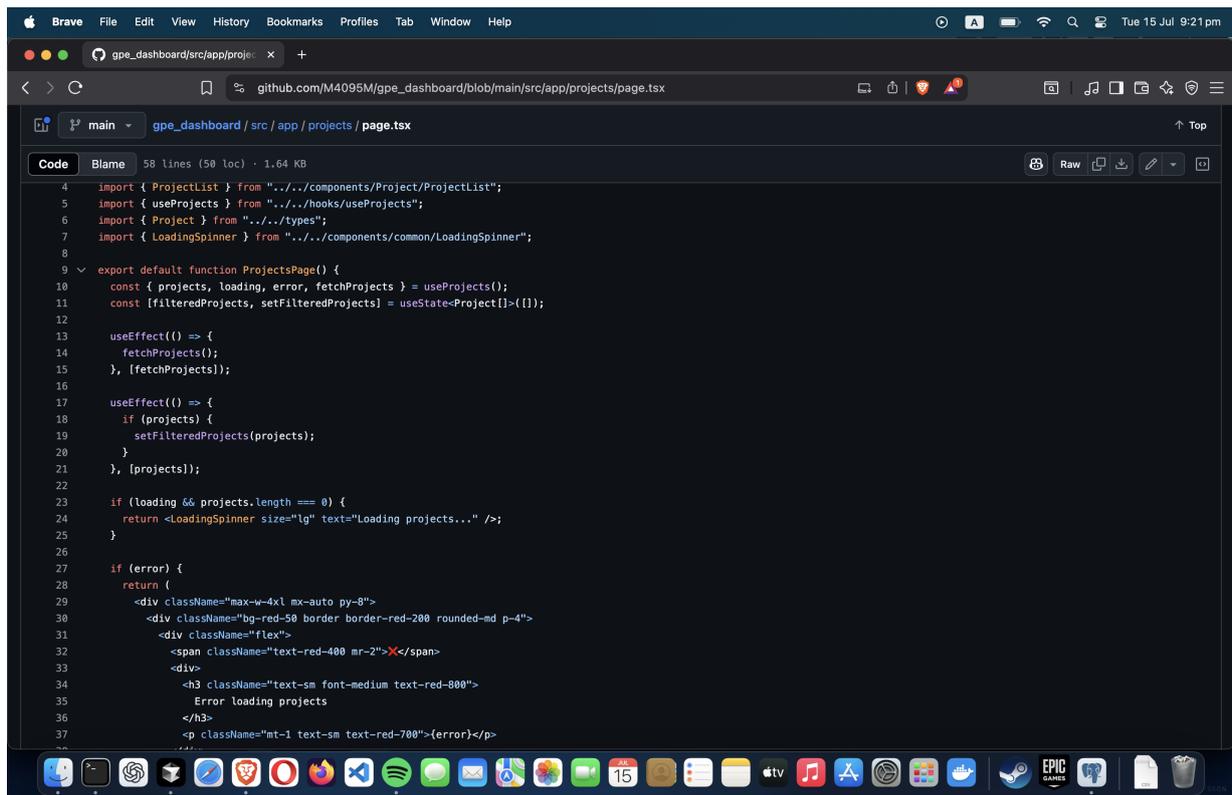


FIGURE 0.4 – Extrait de la base de données PostgreSQL

Annexe C : Chargement des projets dans l'interface React



The image shows a screenshot of a web browser displaying a GitHub repository page for a React application. The browser's address bar shows the URL: `github.com/M4095M/gpe_dashboard/blob/main/src/app/projects/page.tsx`. The code editor displays the following code:

```
4 import { ProjectList } from "../../components/Project/ProjectList";
5 import { useProjects } from "../../hooks/useProjects";
6 import { Project } from "../../types";
7 import { LoadingSpinner } from "../../components/common/LoadingSpinner";
8
9 export default function ProjectsPage() {
10   const { projects, loading, error, fetchProjects } = useProjects();
11   const [filteredProjects, setFilteredProjects] = useState<Project[]>([]);
12
13   useEffect(() => {
14     fetchProjects();
15   }, [fetchProjects]);
16
17   useEffect(() => {
18     if (projects) {
19       setFilteredProjects(projects);
20     }
21   }, [projects]);
22
23   if (loading && projects.length === 0) {
24     return <LoadingSpinner size="lg" text="Loading projects..." />;
25   }
26
27   if (error) {
28     return (
29       <div className="max-w-4xl mx-auto py-8">
30         <div className="bg-red-50 border border-red-200 rounded-md p-4">
31           <div className="flex">
32             <span className="text-red-400 mr-2">✖</span>
33           </div>
34           <h3 className="text-sm font-medium text-red-800">
35             Error loading projects
36           </h3>
37           <p className="mt-1 text-sm text-red-700">{error}</p>
38         </div>
39       </div>
40     );
41   }
42
43   return (
44     <div className="max-w-4xl mx-auto py-8">
45       <div className="bg-white border border-gray-200 rounded-md p-4">
46         <div className="flex">
47           <div className="flex-1">
48             <h2>Projects</h2>
49             <ul>
50               <li>Project 1</li>
51               <li>Project 2</li>
52             </ul>
53           </div>
54           <div className="flex-1">
55             <div>
56               <h3>Error loading projects</h3>
57             </div>
58           </div>
59         </div>
60       </div>
61     );
62   }
63 }
```

FIGURE 0.5 – Extrait de code de React