

ULiège-Faculté des Sciences- Département des Sciences et Gestion de L'Environnement

UNI.LU- Faculty of Science, Technology and Medicine

**Détermination de valeurs de référence nationales du potentiel de réchauffement planétaire de  
l'acier structurel au Luxembourg**

Wokoum Bioum Ingrid Naomi

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE  
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ SPÉCIALISÉE  
(ULIEGE)

MASTER EN DÉVELOPPEMENT DURABLE - FILIÈRE ÉNERGIE-ENVIRONNEMENT  
(UNI.LU)

Année académique 2025-2026

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE :

Prof. Stefan MAAS, Dr Kiki Gratien J. D. et Dr Paul BAUSTERT

COMITÉ DE LECTURE :

Mme Pauline ABRAHAMS

## Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisé qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique\* de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

\*L'autorité académique est représentée par les co-promoteurs, membres du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Wokoum Bioum Ingrid Naomi

[bioumnaomiingrid1@gmail.com](mailto:bioumnaomiingrid1@gmail.com)

## Résumé

L'acier est l'un des principaux matériaux de construction dont la production est associée à des émissions significatives de gaz à effet de serre. Ce mémoire a pour objectif d'identifier les facteurs influençant le Potentiel de Réchauffement Planétaire (PRP) des modules A1-A3 (liés à la production) du cycle de vie de l'acier utilisé dans la construction. Sur cette base, une méthodologie est développée afin d'établir des valeurs de référence nationales pour le Luxembourg. L'étude repose sur l'analyse de 401 Déclarations Environnementales de Produit (DEP). Les données d'importations, de production nationale et les caractéristiques de production de 70 fours répartis dans 11 pays représentant les principales sources d'approvisionnement du marché luxembourgeois sont également analysées. Les parts de marché et les caractéristiques de production ont été combinées afin de construire des scénarios représentatifs de l'acier structurel au Luxembourg. Un modèle de régression linéaire a été développé afin d'identifier les principaux déterminants du PRP et d'estimer les impacts des différents scénarios de production. Les résultats du modèle ont ensuite été pondérés à l'aide des parts de marché et des capacités de production des fours des principaux pays fournisseurs. Des valeurs de référence nationales ont ainsi été obtenues pour les principaux groupes de produits d'acier utilisés dans la construction. Le modèle développé présente un coefficient de détermination  $R^2$  de 83 %, témoignant d'une forte capacité explicative du PRP A1-A3 de l'acier. Les résultats montrent que le type de four utilisé et la quantité de matière secondaire incorporée constituent les principaux facteurs déterminants du PRP de l'acier. Les valeurs de référence obtenues varient de 2,41 kgCO<sub>2e</sub>/kg d'acier pour les produits plats à 1,64 kgCO<sub>2e</sub>/kg pour les produits tubulaires, 1,04 kgCO<sub>2e</sub>/kg pour les produits structurels, 0,73 kgCO<sub>2e</sub>/kg pour les produits d'armature et 0,68 kgCO<sub>2e</sub>/kg pour les produits de stabilisation. Une analyse de sensibilité menée sur deux bâtiments de référence montre que le carbone incorporé d'un bâtiment peut varier sensiblement en fonction de la source des données utilisées pour caractériser le PRP des produits d'acier. Les variations observées sont globalement plus grandes dans un bâtiment à structure acier que pour un bâtiment à structure en béton. Malgré ces écarts, les valeurs de référence développées restent cohérentes avec celles du référentiel ÖKOBAUDAT. La méthodologie développée et les valeurs de référence qui en résultent constituent une contribution au développement de futurs référentiels nationaux relatifs à l'évaluation du carbone incorporé des bâtiments au Luxembourg.

**Mots-clés :** acier structurel ; potentiel de réchauffement planétaire ; déclarations environnementales de produit ; valeurs de référence nationales ; Luxembourg.

---

## Abstract

Steel is one of the primary construction materials whose production is associated with significant greenhouse gas emissions. This thesis aims to identify the factors influencing the Global Warming Potential (GWP) of modules A1-A3 (related to production) in the life cycle of steel used in construction. Based on this, a methodology was developed to establish national reference values for Luxembourg. The study was based on an analysis of 401 Environmental Product Declarations (EPDs). Data on imports, national production, and production characteristics of 70 furnaces across 11 countries representing the main sources of supply for the Luxembourg market were also analyzed. Market shares and production characteristics were combined to develop scenarios representative of structural steel in Luxembourg. A linear regression model was developed to identify the main determinants of the GWP and to estimate the impacts of the various production scenarios. The model's results were then weighted using the market shares and furnace production capacities of the major supplier countries. This yielded national reference values for the main groups of steel products used in construction. The model achieved an  $R^2$  of 83 %, indicating that it explained a substantial proportion of the variation in the A1-A3 GWP of steel products. The results show that the type of furnace used and the amount of secondary material incorporated are the main factors determining the GWP of steel. The national reference values were 2.41 kg CO<sub>2</sub>e/kg for flat products, 1.64 kg CO<sub>2</sub>e/kg for tubular products, 1.04 kg CO<sub>2</sub>e/kg for structural products, 0.73 kg CO<sub>2</sub>e/kg for reinforcing steel products, and 0.68 kg CO<sub>2</sub>e/kg for stabilization products. A sensitivity analysis conducted on two reference buildings shows that a building's embodied carbon can vary significantly depending on the data source used to characterize the GWP of steel products. Overall, the variations observed are greater in steel-framed buildings than in concrete-framed buildings. Despite these differences, the reference values developed remain consistent with those of the ÖKOBAUDAT framework. The proposed methodology and the resulting reference values could support the development of future national frameworks for assessing the embodied carbon of buildings in Luxembourg.

**Keywords:** structural steel ; global warming potential ; environmental product declarations ; national reference values ; Luxembourg.

---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à l'Université du Luxembourg ainsi qu'au ministère de l'économie du Luxembourg, pour l'opportunité qui m'a été offerte de réaliser ce mémoire dans un cadre à la fois enrichissant et stimulant. Je souhaite remercier tout particulièrement Monsieur Ralph Baden, Madame Marielle Ferreira Silva et Monsieur Paul Schosseler pour leur disponibilité et les échanges constructifs qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

J'exprime ma sincère gratitude à mon directeur de mémoire, le Professeur Stefan Maas, pour son accompagnement, ses conseils avisés et les échanges avec des experts qu'il a rendus possibles. Ses remarques pertinentes ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

Je remercie également mon superviseur de l'université de Liège, le Docteur Gratien Kiki, pour sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de ces derniers mois.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de mon encadrant de stage au ministère, Monsieur Paul Baustert, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je souhaite adresser une reconnaissance particulière à Madame Pauline Abrahams, dont les enseignements, les encouragements et les commentaires constructifs ont marqué mon parcours académique.

Je remercie également Madame Liudmila Weber (ArcelorMittal) et Madame Maryam Baniyadi (Paul Wurth) pour le temps qu'elles m'ont généreusement accordé ainsi que pour le partage de leur expertise. Ma gratitude s'étend également à Monsieur Frank Scholzen pour ses commentaires pertinents et les échanges enrichissants, ainsi qu'à Madame Ghizlane El Hajoui (E3Consult) pour sa disponibilité et le partage de données et de ressources ayant contribué à cette recherche.

Je tiens à remercier chaleureusement ma famille pour son amour, son soutien indéfectible et ses encouragements constants tout au long de mes études. J'adresse une reconnaissance particulière à mes parents, pour les multiples opportunités qu'ils m'ont offertes, ainsi qu'à mon frère pour sa présence, son soutien et ses encouragements malgré la distance qui nous sépare. Enfin, je tiens à adresser ma gratitude à mon compagnon pour son soutien et ses encouragements tout au long de cette aventure. Sans leur confiance et leur appui inconditionnel, l'aboutissement de ce mémoire n'aurait pas été possible.

---

## Table des matières

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Résumé.....                                                                      | 3  |
| Abstract.....                                                                    | 4  |
| Remerciements.....                                                               | 5  |
| Table des matières.....                                                          | 6  |
| Liste des figures .....                                                          | 8  |
| Liste des tableaux.....                                                          | 9  |
| Chapitre 1: Introduction.....                                                    | 10 |
| Chapitre 2: Revue de la littérature .....                                        | 13 |
| 2.1 Introduction.....                                                            | 13 |
| 2.2 Filières de production et agents réducteurs.....                             | 14 |
| 2.3 Choix méthodologiques en ACV .....                                           | 14 |
| 2.4 Intensité carbone de l'électricité .....                                     | 15 |
| 2.5 Autres déterminants technologiques .....                                     | 16 |
| 2.6 Matière secondaire .....                                                     | 17 |
| 2.7 Efficacité énergétique des fours.....                                        | 17 |
| 2.8 Emissions en amont .....                                                     | 18 |
| 2.9 Composition chimique de l'acier et alliages.....                             | 18 |
| 2.10 Source d'hydrogène et intensité carbone associée.....                       | 19 |
| 2.11 Procédés de finition.....                                                   | 19 |
| 2.12 Conclusion .....                                                            | 20 |
| Chapitre 3: Méthodologie .....                                                   | 22 |
| 3.1 Introduction.....                                                            | 22 |
| 3.2 Identification des produits d'acier pertinents pour l'ACV des bâtiments..... | 23 |
| 3.3 Analyse des déterminants du PRP de l'acier.....                              | 23 |
| 3.3.1 Construction de la base de données des DEP.....                            | 24 |
| 3.3.2 Construction du modèle de régression .....                                 | 25 |
| 3.4 Caractérisation des flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier ..... | 28 |
| 3.5 Construction de la méthodologie de pondération.....                          | 30 |
| 3.5.1 Définition des scénarios de production.....                                | 31 |
| 3.5.2 Pondération technologique.....                                             | 32 |
| 3.5.3 Pondération par les parts de marché.....                                   | 32 |
| 3.5.4 Hypothèses et traitement des données manquantes .....                      | 32 |

---

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6 Analyse de sensibilité à l'échelle du bâtiment .....                      | 34  |
| 3.6.1 Calcul du carbone incorporé des bâtiments .....                         | 34  |
| 3.6.2 Traitement des pénalisations .....                                      | 35  |
| 3.7 Conclusion .....                                                          | 36  |
| Chapitre 4: Résultats et discussion.....                                      | 37  |
| 4.1 Introduction.....                                                         | 37  |
| 4.2 Description de la base de données des DEP.....                            | 37  |
| 4.3 Résultats des modèles de régression .....                                 | 41  |
| 4.3.1 Résultats de la comparaison du modèle vs Worldsteel Association .....   | 44  |
| 4.4 Flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier.....                   | 45  |
| 4.5 Valeurs de référence nationales obtenues .....                            | 47  |
| 4.6 Résultats de l'analyse de sensibilité.....                                | 48  |
| 4.7 Conclusion .....                                                          | 52  |
| Chapitre 5: Conclusion .....                                                  | 54  |
| Références.....                                                               | 55  |
| Annexes .....                                                                 | I   |
| Annexe A: Processus de sélection des articles fondée sur le cadre PRISMA..... | I   |
| Annexe B: Données des flux d'approvisionnement de l'acier.....                | II  |
| Annexe C: Données de l'analyse de sensibilité à l'échelle du bâtiment.....    | XI  |
| Annexe D: Rapports des entretiens avec les experts du secteur .....           | XIV |

---

## Liste des figures

|                                                                                                                               |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure 1. Organisation générale de la démarche méthodologique .....                                                           | 23   |
| Figure 2. Répartition géographique des sites de production des DEP analysées .....                                            | 38   |
| Figure 3. Distribution des variables catégorielles et continues de l'échantillon étudié .....                                 | 39   |
| Figure 4. Capacité explicative des variables incluses dans le modèle .....                                                    | 40   |
| Figure 5. Comparaison des valeurs PRP de Worldsteel aux valeurs calculées .....                                               | 44   |
| Figure 6. <i>Sankey diagram</i> : flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier .....                                    | 46   |
| Figure 7. Valeurs de référence nationales obtenues et intervalles d'incertitude P5-P95 .....                                  | 47   |
| Figure 8. Variation du carbone incorporé du bâtiment à structure en acier selon la source des données du PRP de l'acier ..... | 49   |
| Figure 9. Variation du carbone incorporé du bâtiment à structure en béton selon la source des données du PRP de l'acier ..... | 50   |
| Figure 10. Procédure de sélection des articles fondée sur le cadre PRISMA .....                                               | I    |
| Figure 11. Parts de marché des différents groupes de produits en acier au Luxembourg.....                                     | II   |
| Figure 12. Comparaison des résultats INIES et ÖKOBAUDAT sans pénalisation pour le bâtiment à structure en acier .....         | XII  |
| Figure 13. Comparaison des résultats INIES et ÖKOBAUDAT sans pénalisation pour le bâtiment à structure en béton armé .....    | XIII |
| Figure 14. Relation linéaire entre la matière secondaire et le contenu recyclé .....                                          | XIII |

---

## Liste des tableaux

|                                                                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tableau 1. Synthèse des déterminants du PRP de la littérature consultée .....                                       | 20   |
| Tableau 2. Classification des types de produits en acier utilisés dans le bâtiment .....                            | 23   |
| Tableau 3. Variables considérées pour le développement du modèle de régression .....                                | 26   |
| Tableau 4. Hypothèses de comparaison du modèle aux données de la World Steel Association.....                       | 28   |
| Tableau 5. Correspondance entre les types de produits et les codes du système harmonisé .....                       | 29   |
| Tableau 6. Paramètres de pondération .....                                                                          | 31   |
| Tableau 7. Comparaison de la performance des modèles de régression.....                                             | 41   |
| Tableau 8. Coefficients du modèle de régression principal sans termes d'interaction .....                           | 42   |
| Tableau 9. Coefficients du modèle de régression avec termes d'interaction .....                                     | 42   |
| Tableau 10. Paramètres de collecte des données UN Comtrade.....                                                     | II   |
| Tableau 11. Parts de marché pour les différentes catégories de produit selon les données COMTRADE.....              | III  |
| Tableau 12. Données d'estimation de la consommation nationale .....                                                 | IV   |
| Tableau 13. Données des technologies (GIST).....                                                                    | V    |
| Tableau 14. Description des scénarios construits .....                                                              | VIII |
| Tableau 15. Description des produits des différentes bases de données utilisées pour l'analyse de sensibilité ..... | XI   |
| Tableau 16. Calcul des valeurs génériques INIES sans pénalisation pour le bardage en acier.....                     | XII  |
| Tableau 17. PRP des différents scénarios de l'analyse de sensibilité .....                                          | XII  |

## Chapitre 1: Introduction

L'atteinte des objectifs climatiques visant à limiter le réchauffement planétaire repose sur une réduction rapide et profonde des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle mondiale [1]. Dans ce contexte, l'industrie du fer et de l'acier occupe une place centrale en raison de son importance énergétique et environnementale. Elle représente environ 8 % de la demande énergétique finale mondiale et génère près de 7 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur énergétique, émissions de procédé comprises [2].

La production de l'acier se compose de deux étapes principales. La première consiste à réduire le minerai de fer afin de le transformer en fer métallique. Elle peut se faire dans un haut fourneau (Blast Furnace, BF), ou par réduction directe (Direct Reduction Iron, DRI). Le procédé DRI s'effectue à l'état solide avec différents agents réducteurs : le gaz naturel (DRI-GN), l'hydrogène (DRI-H<sub>2</sub>) ou le biosyngas [3]. Il existe également des procédés nouveaux comme la réduction flash du minerai fin en suspension (*Flash Ironmaking Technology*, FIT) [4] [5].

La deuxième étape correspond à l'élaboration de l'acier qui peut être réalisée selon deux filières principales : la production intégrée de l'acier à partir du fer métallique dans un four à oxygène de base (BOF) et la production de l'acier à partir de ferraille recyclée dans un four à arc électrique (EAF) [3]. Bien que ces différentes filières soient distinctes, en pratique elles s'imbriquent souvent à travers des mélanges de ferraille, de fer issu du haut fourneau et de fer préréduit. De manière générale, l'acier produit par un four EAF présente une teneur en matériaux recyclés nettement plus élevée que l'acier issu d'un BOF.

L'acier est un matériau incontournable pour le secteur de la construction. Ce dernier est à l'origine d'environ 21 % des émissions mondiales de GES soulignant l'importance de l'amélioration des performances environnementales des matériaux de construction et de l'acier en particulier [6].

Les configurations de production de l'acier influencent directement son impact environnemental. L'évaluation de ces impacts repose notamment sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), réalisée conformément aux normes ISO 14040 et ISO 14044 [7], [8]. De même, les Déclarations Environnementales de Produit (DEP) établies selon les normes ISO 14025 [9] (et EN 15804+A2 [10] dans le cadre des produits de construction) permettent de quantifier les impacts environnementaux des matériaux notamment le Potentiel de Réchauffement Planétaire (PRP) à chaque étape de leur cycle de vie.

Le PRP mesure la capacité de l'ensemble des GES à retenir la chaleur dans l'atmosphère avec le CO<sub>2</sub> pris comme référence, mesuré sur une période donnée. Pour le bâtiment, il mesure l'impact environnemental

sur tout son cycle de vie. Dans le secteur de la construction, le PRP tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un bâtiment, est donc une métrique qui permet de comparer l'impact climatique de produits ou modes constructifs de manière holistique.

Cette approche s'inscrit également dans le cadre du Règlement des produits de construction (RPC) [11] au niveau des produits, et de la Directive sur la Performance Énergétique des Bâtiments (DPEB) [12] au niveau des bâtiments. La DPEB fait évoluer la manière dont les politiques publiques traitent la performance énergétique des bâtiments. De nombreux efforts ont déjà été faits pour la réduction du carbone opérationnel, c'est-à-dire l'ensemble des émissions liées à la consommation d'énergie en phase d'utilisation. La réglementation s'élargit désormais à la prise en compte du carbone incorporé qui comprend toutes les émissions liées à la production, au transport, à la construction, à l'entretien et à la fin de vie du bâtiment.

L'intégration du PRP tout au long du cycle de vie, mise en avant par la DPEB, montre que le développement de référentiels solides pour chaque pays membre est important. Des difficultés persistent tout de même. La première concerne la disponibilité de données, qui est limitée. Cela concerne aussi bien les DEP pour des produits spécifiques (l'élaboration de telles données étant facultative avant le RPC) que les données moyennes et génériques (souvent publiées par les pouvoirs publics), qui fournissent des valeurs de référence en l'absence de données spécifiques.

La deuxième concerne les résultats d'ACV, qui sont variables selon les hypothèses et les méthodes utilisées [13]. La variabilité rend la comparaison des résultats et l'ACV des bâtiments difficiles. Ainsi, la détermination des valeurs de référence nationales, surtout pour les matériaux clés comme l'acier, dont l'impact carbone est important dans les bâtiments devient nécessaire.

Le Luxembourg est confronté à un défi supplémentaire : son économie ouverte dépend des importations pour de nombreux produits de construction, ce qui nécessite des données provenant de sources diverses, alors que les données génériques issues des pays voisins pourraient ne pas être représentatives du contexte national.

C'est dans cette logique que s'inscrit cette étude dont l'objectif principal est de développer une méthodologie permettant d'établir des valeurs de référence nationales du PRP A1-A3 des produits en acier utilisés dans la construction au Luxembourg. Pour atteindre cet objectif, cette étude s'articule autour des deux questions suivantes :

- Quels sont les principaux facteurs déterminant le PRP A1-A3 des produits d'acier ?

- Comment développer une méthode de pondération qui permettrait d'établir une valeur de référence nationale du PRP pour les différents types de produits en acier utilisés dans la construction au Luxembourg ?

Les résultats de cette étude permettront d'établir des valeurs de référence susceptibles de contribuer au développement des futurs référentiels nécessaires à la mise en œuvre des exigences de la DPEB au Luxembourg, ainsi qu'à leur intégration dans les certificats énergétiques des bâtiments.

## **Chapitre 2: Revue de la littérature**

### **2.1 Introduction**

Ce chapitre présente une revue de la littérature des facteurs qui influencent le PRP de l'acier. Il englobe des études récentes sur le sujet et explique l'apport de ces dernières pour mieux comprendre les émissions du secteur de la sidérurgie. L'objectif est à la fois de montrer les points que la littérature a déjà permis de mettre en lumière et d'identifier ce qui reste à explorer pour mieux appréhender les déterminants réels du PRP de l'acier. Les débats portent sur les questions de méthode et de technologie. Le corpus de la revue est composé de 6 revues de littérature, 34 cas d'études d'ACV et 5 cas d'études n'étant pas basés sur une ACV.

La revue est présentée suivant les facteurs qui influencent le PRP de l'acier, comme cela ressort de l'analyse. L'ensemble de ces travaux permettra de comprendre les variabilités observées et d'identifier quels sont les facteurs qui déterminent le PRP de la production d'acier structurel aidé par deux principales approches. D'une part, les études fondées sur l'ACV qui analysent la manière dont les choix méthodologiques influencent les résultats des émissions de GES et d'autre part, les recherches portant sur les technologies utilisées pour la fabrication de l'acier. Parmi ces recherches, certaines comparent deux ou plusieurs technologies à l'aide de scénarios et de modèles divers. Tandis que d'autres font des analyses prospectives des nouvelles technologies bas-carbone émergentes afin de mettre en lumière les stratégies de décarbonation du secteur sidérurgique.

La revue de littérature a été menée entre le 23 mars et le 15 avril 2026 dans le but d'identifier les principaux facteurs influençant le PRP de l'acier, selon la littérature scientifique. Les recherches, réalisées en français et en anglais à l'aide de Google Scholar et des ressources accessibles via le Luxembourg Learning Centre (LLC), reposaient sur différentes combinaisons de mots-clés liés à la production d'acier, au PRP, à l'ACV et aux principales filières sidérurgiques. Les articles ont été sélectionnés à partir des titres, puis des résumés et des textes complets. Une analyse des références bibliographiques et des études citant les études déjà sélectionnées a permis de retrouver des études pertinentes. Seuls les travaux publiés entre 2016 et 2026, présentant une méthodologie explicite et pertinente pour la production d'acier et/ou le secteur de la construction, ont été retenus. La recherche a été arrêtée lorsque l'ajout de publications n'apportait plus de nouvelles informations. Au total, 45 articles ont été sélectionnés pour constituer le corpus final de la revue. Le processus détaillé de sélection des articles, fondé sur le cadre PRISMA, est présenté en Annexe A et illustré par la Figure 10.

### 2.2 Filières de production et agents réducteurs

De nombreuses études montrent que le choix du type de four et de l'agent réducteur (coke, gaz naturel, hydrogène, biosyngas) est le premier déterminant du PRP de l'acier [14] [15] [16]. La filière BF-BOF repose sur l'utilisation massive de coke et de charbon lors de la réduction du minerai de fer. Elle présente systématiquement les PRP des phases A1-A3 les plus élevés, généralement compris entre 1,6 et 2,5 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier produit avec une moyenne mondiale autour de 1,8-2,1 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier [17] [18] [19]. Selon [20] [21] [22], la substitution partielle du coke par des agents biosourcés (bio hydrochar, charbon végétal, boulettes carbonées issues de biomasse) permet une réduction modérée mais significative du PRP. Cette réduction peut atteindre 14 à 30 % selon les taux de substitution techniquement acceptables étant donné les limites liées aux contraintes thermodynamiques et mécaniques du haut fourneau.

En revanche, les filières EAF présentent des PRP beaucoup plus bas. Les valeurs sont typiquement comprises entre 0,4 et 0,8 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier, principalement dues à l'absence de la phase de réduction primaire du minerai de fer substitué par l'utilisation de ferraille recyclée [23] [24] [25]. La filière DRI-EAF présente des performances variables selon l'agent réducteur : le DRI-GN permet une réduction des émissions de 30 à 40 % par rapport au BF-BOF, tandis que le DRI-H<sub>2</sub> atteint des réductions allant de 80 à 98 % par rapport au BF-BOF à condition que l'hydrogène soit produit avec une électricité provenant de sources renouvelables [26] [27] [28]. Selon [17], les leviers de réductions les plus significatifs reposent sur l'utilisation de l'hydrogène comme agent réducteur, d'une électricité décarbonée et l'augmentation de la production d'acier à partir de la ferraille. Cette combinaison pourrait ramener le PRP de l'acier à environ 0,4 à 0,5 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier produit.

Certaines études montrent également un fort potentiel de réduction des émissions de GES de la sidérurgie par l'intégration d'agents réducteurs alternatifs tels que les biosyngas ou le biochar. Les procédés basés sur l'hydrogène renouvelable ou le biosyngas figurent parmi les plus performants. Les réductions peuvent atteindre 75 à 90 % par rapport à la filière BF-BOF, voire des émissions négatives lorsqu'ils sont couplés aux technologies de Captage et Stockage de Carbone (CCS) [13] [29]. Ces résultats confirment que le type de four et le type d'agent influencent grandement l'empreinte carbone de l'acier. Au-delà des technologies de production, plusieurs travaux montrent que les choix méthodologiques en ACV influencent considérablement les valeurs de PRP obtenues.

### 2.3 Choix méthodologiques en ACV

Un grand nombre d'études soulignent que les résultats du PRP de l'acier dépendent fortement des choix méthodologiques en ACV [30] [31] [32]. Ces choix engendrent une variabilité significative des résultats

selon le périmètre établi (berceau à la porte, berceau à la tombe), les allocations des émissions entre coproduits et le traitement des coproduits pour ne citer que ceux-là. Selon [33] [34] [31], des écarts considérables des résultats des PRP A1-A3 pour une même filière de production d'acier résultent des choix méthodologiques ACV. D'une part, certaines études intégrant explicitement la valorisation énergétique des gaz de procédé montrent une diminution du PRP net, en raison des crédits d'électricité ou de chaleur évités [21] [35]. D'autre part, des études attribuent l'ensemble des émissions au produit final, ce qui conduit à des valeurs de PRP plus élevées [20] [36] [22].

Dans les études intégrant la biomasse ou le biosyngas la comptabilisation du carbone biogénique constitue un point méthodologique particulier. Certains auteurs considèrent la neutralité carbone et d'autres attribuent des crédits explicites ou des hypothèses de substitution [29] [37]. De même, l'intégration ou non des crédits du module D, valorisation au-delà de la fin de vie influence fortement l'évaluation comparative de l'acier bas-carbone au stade de fin de vie. Selon [36] [21] lorsque la neutralité carbone de la biomasse est supposée, les bénéfices climatiques sont maximisés, tandis que les hypothèses plus prudentes intégrant l'usage des sols ou de la logistique réduisent l'avantage environnemental net.

Plusieurs recherches dénoncent ainsi un manque d'harmonisation des frontières du système, une utilisation fréquente de données génériques, ainsi qu'un risque de déplacer les impacts entre les catégories environnementales [13] [33]. Ces limites expliquent l'appel récurrent à des ACV basées sur des données primaires transparentes et comparables, afin d'éviter des conclusions excessivement optimistes ou contradictoires [34] [38] [31]. À ces considérations méthodologiques s'ajoutent des paramètres propres aux systèmes de production, au premier rang desquels figure l'intensité carbone de l'électricité utilisée.

### 2.4 Intensité carbone de l'électricité

L'intensité carbone de l'électricité apparaît comme l'un des facteurs les plus déterminants du PRP, en particulier pour la filière EAF [39] [40] [19]. Les études analysées montrent qu'un four EAF alimenté par une électricité carbonée peut voir le PRP de l'acier augmenter jusqu'à environ 1,2 t CO<sub>2</sub>e/t. Cependant, un mix électrique très bas permet de descendre à environ 0,4 à 0,2 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier produit selon l'électricité utilisée [23] [41].

Dans les scénarios de production de l'acier à partir de l'hydrogène comme agent réducteur, la dépendance à l'électricité est encore plus significative. Des travaux montrent que l'empreinte carbone de la voie DRI-H<sub>2</sub> peut varier de 0,2 à plus de 3 t CO<sub>2</sub>e/t, principalement à cause du mix électrique utilisé pour l'électrolyse [41] [19]. Les analyses prospectives confirment qu'en l'absence de décarbonation quasi-totale de

l'électricité, la réduction directe à l'hydrogène n'offre aucun gain climatique par rapport aux routes conventionnelles [31] [40] [42].

Ainsi, la littérature converge vers l'idée selon laquelle l'électrification de la sidérurgie n'est climatiquement efficace que sous condition d'une électricité faiblement carbonée. Les résultats montrent que les voies électrifiées alimentées par une électricité très décarbonée offrent les réductions de PRP les plus importantes, pouvant atteindre jusqu'à 95 %, faisant de la transition climatique globale un prérequis incontournable à la décarbonation profonde du secteur sidérurgique [15] [17] [39]. Outre l'électricité, d'autres caractéristiques technologiques des procédés de fabrication contribuent également aux émissions associées à la production de l'acier.

### 2.5 Autres déterminants technologiques

Plusieurs études soulignent l'influence de sous-systèmes technologiques spécifiques comme le réchauffage, les technologies CCS sur le PRP de l'acier [42] [43] [37]. Les fours de réchauffage représentent un poste significatif d'émission dans certaines filières EAF, liés notamment au laminage. Leur suppression par le transfert direct des billettes chaudes peut réduire le PRP d'environ 41 % [38].

Les technologies de CCS apparaissent comme un levier potentiel pour les installations existantes, avec des réductions du PRP comprises entre 48 et 76 % [36] [34] [44]. Selon [45], les technologies « ultra-bas carbone » (DRI-H<sub>2</sub>, CCS) offrent un potentiel de 80 à 95 % de réduction des émissions. Toutefois, plusieurs travaux mettent en garde contre des hypothèses trop optimistes concernant les rendements de captage (>90 %) et soulignent l'augmentation concomitante des consommations énergétiques [30] [40] [42]. Selon [40], les filières équipées de CCS ne réduisent les émissions que de 15 à 45 % et risqueraient de prolonger la dépendance aux hauts fourneaux et créer des effets de verrouillage technologique. Il faut noter que ces technologies de captage et stockage de carbone sont encore en phase d'expérimentation et sont très coûteuses. Elles ne sont pas encore appliquées à plus grande échelle.

Ces études concluent que le CCS pourrait contribuer à court terme à la réduction des émissions, mais qu'il ne saurait se substituer à une transformation structurelle des procédés sans risque de verrouillage technologique [42] [46]. Selon Shatokha [35], l'injection d'hydrogène ou de mélange H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> dans le BF-BOF apparaît également comme une voie intermédiaire qui permettrait de réduire le PRP tout en conservant l'architecture des procédés existants. En dehors des facteurs technologiques de production, l'injection de matière secondaire est souvent identifiée dans la littérature comme un déterminant majeur du PRP de l'acier.

### 2.6 Matière secondaire

La disponibilité, la qualité et le taux de ferraille constituent des déterminants majeurs du PRP de l'acier, en particulier pour les filières EAF ET DRI-EAF [46] [47] [48]. Une augmentation de la quantité de ferraille permet une réduction directe de la consommation énergétique et des émissions primaires, avec des gains pouvant atteindre 40 à 50 % par rapport à l'acier primaire [14] [45] [25].

La qualité de la ferraille influence également la consommation d'énergie, la quantité d'additifs et les pertes métallurgiques. Une ferraille nettoyée ou de meilleure qualité permet de réduire jusqu'à 45 % de la consommation électrique de la filière EAF. Ainsi, la circularité des matériaux est un levier clé de la décarbonation. Toutefois, plusieurs études soulignent que la disponibilité future de la ferraille à l'échelle mondiale reste un sujet critique, freinant une généralisation exclusive des filières EAF [16] [25] [46].

Ainsi, bien que la ferraille constitue un levier majeur de décarbonation, son potentiel reste contraint par des facteurs structurels et géographiques [17] [25]. D'autres facteurs liés à la performance énergétique des fours jouent par ailleurs un rôle important pour les résultats du PRP de l'acier.

### 2.7 Efficacité énergétique des fours

L'efficacité énergétique des fours apparaît comme un levier transversal de décarbonation de la sidérurgie, quel que soit le procédé étudié [38] [43] [37]. Les pertes thermiques, les rendements des fours, l'optimisation des injections et le pilotage en temps réel influencent la consommation énergétique spécifique par tonne d'acier produite [23] [43].

Des études basées sur l'optimisation numérique et le machine learning montrent que ces optimisations permettent de réduire la consommation électrique (-2 à -4 %), le gaz naturel (-3 à -5 %), ainsi que l'utilisation de la ferraille, de charbon d'injection et d'oxygène (-1 à -3 %), ce qui se traduit par une baisse du PRP comprise entre 1 % et 2,2 %. Ainsi, les gains d'efficacité de seulement 2 à 5 % sur l'électricité ou les combustibles se traduisent déjà par une réduction mesurable du PRP [43]. De même, des équipements obsolètes ou peu performants peuvent annuler une partie des bénéfices attendus des procédés pourtant bas-carbone [25] [23]. Un équipement peu performant ayant un faible rendement, des pertes thermiques et électriques demandera davantage d'énergie par tonne d'acier produit.

Ces travaux confirment que la décarbonation ne repose pas uniquement sur les choix technologiques, mais aussi sur la qualité et l'efficacité des fours [17].

### 2.8 Émissions en amont

Les émissions en amont liées à l'extraction du minerai de fer, à la production de pellets, au charbon, à la biomasse et aux transports représentent une part significative du PRP total de l'acier [35] [34] [28]. Plusieurs études montrent que ces émissions peuvent représenter 20 à 50 % du PRP, voire plus dans les filières à hydrogène ou biosourcées [23] [40]. Les auteurs de [23] montrent que la filière DRI-EAF avec utilisation de biosyngas comme gaz réducteur présente un PRP de 0,25 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier produit, dont près de 80 % proviennent des émissions en amont de la phase de production.

L'extraction et la préparation du minerai sont souvent identifiées comme des déterminants majeurs du PRP de l'acier, notamment en raison de l'énergie nécessaire à l'enrichissement et à l'agglomération [23] [40]. Les distances de transport influencent également fortement le PRP, certains scénarios devenant moins favorables lorsque la logistique est longue ou énergivore [49]. Ainsi, les gains réalisés au niveau du four peuvent être partiellement annulés si les chaînes d'approvisionnement en amont ne sont pas simultanément décarbonées [13] [31]. Selon [21], une logistique plus sobre et une meilleure valorisation des coproduits peuvent réduire le PRP de l'acier de près de 35 %, soulignant l'importance des chaînes en amont souvent négligées.

### 2.9 Composition chimique de l'acier et alliages

Un nombre plus restreint d'études souligne l'importance de la composition chimique des produits d'acier sur le PRP [19] [50]. La présence d'éléments d'alliage tels que le chrome (Cr), le Vanadium (V), le Titane (Ti), le Manganèse (Mn), le Nickel (Ni), le Molybdène (Mo) et le Cuivre (Cu) augmente significativement l'empreinte carbone en raison de leurs procédés d'extraction et de raffinage très énergivores [34] [51].

Des analyses basées sur des données de recettes industrielles montrent que le PRP d'un acier allié peut varier de +20 à +500 kg CO<sub>2</sub>e/t selon la formulation [34]. Ces résultats justifient le développement de méthodologies ACV intégrant explicitement la chimie réelle des produits d'acier afin d'éviter des comparaisons biaisées [51]. La littérature montre ainsi que la décarbonation de la sidérurgie ne peut être dissociée des choix de conception du produit. Selon [52], l'acier à faible teneur en carbone a un impact moindre au stade de production par rapport à l'acier standard. De même, les résultats du cycle de vie entier de l'acier faiblement carboné sont environ 24 % inférieurs comparés à ceux de l'acier au carbone standard.

### 2.10 Source d'hydrogène et intensité carbone associée

Les études consacrées aux filières basées sur l'hydrogène insistent sur la source d'énergie de production de l'hydrogène comme facteur influençant le PRP [41] [53] [54]. Selon [19], le procédé BF-BOF enregistre un PRP d'environ 2,1 t CO<sub>2</sub>e/t d'acier produit, alors que le passage au DRI alimenté par de l'hydrogène réduit les émissions à 0,76 t CO<sub>2</sub>e/t lorsque l'électricité utilisée est entièrement décarbonée. De manière générale, l'utilisation d'hydrogène permet d'atteindre des réductions de 57 à 67 %, selon la technologie utilisée.

Les analyses prospectives montrent que l'empreinte carbone de l'acier DRI-H<sub>2</sub> peut varier d'un facteur supérieur à 10 selon l'intensité carbone de l'hydrogène [46]. Selon Harpprecht et al. [42], les besoins massifs en électricité rendent ces scénarios particulièrement sensibles aux trajectoires énergétiques futures. L'hydrogène issu de l'électrolyse alimenté par de l'énergie renouvelable permet les meilleures performances climatiques [35], tandis que l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles réduit fortement, voire annule, les bénéfices attendus [26], [28]. Plusieurs études montrent ainsi que le PRP des filières DRI-H<sub>2</sub> dépend davantage de la source d'hydrogène que du procédé sidérurgique lui-même [46] [35].

Ces recherches permettent de conclure que le déploiement du DRI-H<sub>2</sub> constitue une option crédible de décarbonation uniquement dans les contextes énergétiques très spécifiques, avec un accès durable à une électricité bas-carbone [39] [42]. Selon [31] [41], la filière DRI-EAF alimentée par l'hydrogène devient réellement performante seulement si l'électricité est décarbonée, l'électrolyseur de l'EAF étant le plus gros contributeur aux émissions.

### 2.11 Procédés de finition

Les derniers facteurs émergeant de notre analyse des déterminants du PRP de l'acier sont les procédés de finition et de transformation de l'acier tels que le laminage, les traitements thermiques, la galvanisation, les revêtements de surface. Ils sont peu étudiés dans la littérature, mais ils peuvent néanmoins influencer significativement les résultats du PRP lorsque le périmètre ACV est élargi au-delà de l'acier brut [38]. Selon [38], le transfert des billettes chaudes du couloir de coulée continue vers le laminoir permet de supprimer le four de réchauffement et de réduire le PRP de 0,27 à 0,47 t CO<sub>2</sub>e/t de barre d'armature produite, soit une baisse de 41 %.

Certaines ACV intégrant les étapes de coulée continue, de réchauffage et laminage montrent que ces procédés représentent une part non négligeable du PRP total de l'acier, principalement en raison de la consommation d'énergie électrique et thermique [38].

## Chapitre 2: Revue de la littérature

Les différents facteurs présentés au cours de cette revue n'ont pas tous la même importance dans la littérature. Le Tableau 1 en propose une synthèse et met en évidence les déterminants les plus étudiés parmi les travaux consultés.

**Tableau 1.** Synthèse des déterminants du PRP de la littérature consultée

| Numéro | Facteurs déterminants du PRP de l'acier                                                   | Occurrences | Citations                                                                                                          |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2      | Méthodologie ACV (périmètre, hypothèses, répartition des impacts, traitements coproduits) | 23          | [13] [33] [34] [51] [16] [38] [43] [30] [31] [32] [49] [52] [37] [53] [50] [55] [25] [36] [21] [35] [35] [22] [56] |
| 3      | Intensité carbone de l'électricité/ Mix électrique                                        | 23          | [13] [14] [15] [17] [16] [18] [43] [23] [45] [31] [24] [32] [41] [39] [40] [19] [53] [25] [42] [46] [54] [26] [28] |
| 4      | Quantité et qualité de la ferraille/matière secondaire                                    | 21          | [14] [45] [25] [16] [18] [38] [43] [41] [40] [19] [53] [25] [46] [17] [45] [31] [24] [42] [46] [47] [48]           |
| 5      | Autres déterminants technologiques (four de réchauffement, CCS/CCUS)                      | 16          | [30] [18] [45] [49] [40] [42] [43] [37] [42] [46] [36] [35] [35] [44] [47] [48]                                    |
| 6      | Émissions en amont (matières premières, mines, charbon, pellets, transport)               | 16          | [13] [35] [18] [30] [45] [34] [23] [31] [24] [32] [41] [39] [40] [21] [28] [49]                                    |
| 7      | Efficacité énergétique/ Performances des fours                                            | 13          | [23] [18] [38] [43] [17] [45] [31] [41] [39] [54] [37] [53] [25]                                                   |
| 8      | Source d'hydrogène et intensité carbone associé                                           | 11          | [31] [41] [39] [19] [53] [42] [46] [54] [35] [26] [28]                                                             |
| 9      | Composition chimique / alliages                                                           | 5           | [34] [51] [52] [19] [50]                                                                                           |
| 10     | Procédés de finition et de transformation (recuison, revêtements, galvanisation)          | 1           | [38]                                                                                                               |

### 2.12 Conclusion

Ce chapitre a permis d'identifier les principaux facteurs influençant le PRP des produits en acier et de mettre en évidence leur contribution à la variabilité des résultats rapportés dans la littérature. La synthèse présentée dans le Tableau 1 montre que le type de four, les choix méthodologiques en ACV, l'intensité carbone de l'électricité et la quantité de matière secondaire incorporée constituent les déterminants les plus fréquemment étudiés. D'autres facteurs, tels que les émissions en amont, l'efficacité énergétique, la source d'hydrogène, la composition chimique ou les procédés de finition, apparaissent également comme des paramètres susceptibles d'influencer le PRP, bien que leur importance soit moins souvent documentée.

Cette analyse met toutefois en évidence plusieurs limites des travaux existants. L'hétérogénéité des périmètres d'étude et des méthodologies d'ACV rend les comparaisons entre études difficiles et contribue à la variabilité observée dans les résultats. Par ailleurs, de nombreux travaux reposent sur des scénarios prospectifs dont les hypothèses demeurent incertaines, notamment concernant le déploiement de l'hydrogène, le captage du carbone ou la disponibilité future de la ferraille. Enfin, la littérature met en évidence la variabilité du PRP des produits en acier. Cependant, elle en explique rarement les causes de manière quantitative et propose peu de démarches permettant de transposer ces connaissances à un contexte national spécifique. Ces constats servent de fondement à la méthodologie présentée au chapitre suivant, dont l'objectif est d'expliquer cette variabilité et d'établir des valeurs de référence adaptées au contexte luxembourgeois.

## Chapitre 3: Méthodologie

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie développée pour établir les valeurs de référence nationales du PRP des produits en acier utilisés dans la construction au Luxembourg. L'étude se concentre sur le PRP des modules A1-A3, correspondant au périmètre « du berceau à la porte de l'usine » (cradle-to-gate) de l'ACV et structurée par la norme EN 15804+A2. Ces modules couvrent les étapes d'approvisionnement en matières premières (A1), de transport vers les sites de production (A2) et de fabrication (A3).

La démarche méthodologique s'articule autour de la mobilisation de différentes sources de données afin d'établir des valeurs de référence adaptées au contexte luxembourgeois. Elle débute par l'identification des produits pertinents pour l'ACV des bâtiments et l'analyse des facteurs influençant leur PRP à partir de la littérature et des DEP à travers la méthode de régression linéaire. Les données commerciales et industrielles sont ensuite mobilisées pour caractériser les approvisionnements en acier du Luxembourg. Ces deux volets sont combinés dans une méthode de pondération fondée sur les technologies de production et les parts de marché. Enfin, les valeurs obtenues sont accompagnées d'une analyse des incertitudes et évaluées à l'échelle du bâtiment au moyen d'une analyse de sensibilité.

La [Figure 1](#) présente l'organisation générale de la démarche méthodologique, depuis l'identification des produits délimitant le périmètre de l'étude jusqu'à l'évaluation de l'impact des valeurs de référence nationales obtenues à l'échelle du bâtiment.



**Figure 1.** Organisation générale de la démarche méthodologique

### 3.2 Identification des produits d'acier pertinents pour l'ACV des bâtiments

Les différents produits d'acier ont été regroupés en plusieurs catégories correspondant à leurs principales applications dans le secteur de la construction. Les caractéristiques et les usages associés à chacune de ces catégories sont présentés dans le [Tableau 2](#).

**Tableau 2.** Classification des types de produits en acier utilisés dans le bâtiment

| Catégorie                 | Exemples                    | Usage principal            |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Produits structurels      | Sections, profilés          | Structures porteuses       |
| Produits d'armature       | Barres d'armature, treillis | Renforcement du béton      |
| Produits tubulaires       | Tubes, tuyaux               | Structures secondaires     |
| Produits de stabilisation | Palplanches                 | Stabilisation, soutènement |
| Produits plats            | Tôles, bobines, plaques     | Façades, toitures          |

### 3.3 Analyse des déterminants du PRP de l'acier

L'analyse des déterminants du PRP A1-A3 de l'acier s'est faite en deux étapes principales. La première a permis d'identifier les différents facteurs susceptibles d'influencer les résultats du PRP A1-A3 de l'acier et de collecter les données permettant de les analyser. La deuxième consiste à mesurer l'importance réelle de chaque facteur à travers la méthode statistique de régression linéaire.

### 3.3.1 Construction de la base de données des DEP

Les déterminants identifiés dans la littérature ont servi de base à la sélection des variables recherchées dans les DEP. Une base de données de 401 déclarations environnementales de produit (DEP) a été constituée afin d'analyser l'influence de chacun des facteurs identifiés sur le PRP des produits en acier. Établies conformément aux normes ISO 14025 et EN 15804+A2, ces déclarations fournissent des informations environnementales vérifiées sur les matériaux de construction, notamment leurs impacts sur le cycle de vie du bâtiment ainsi que les caractéristiques des procédés de fabrication [9], [10]. Cette section présente la collecte des données des DEP ainsi que les hypothèses de traitement de données manquantes.

#### *Collecte des données des DEP*

Les DEP ont été collectées à partir de plusieurs programmes et bases de données reconnus afin de constituer un échantillon représentatif des principaux produits sidérurgiques disponibles sur le marché européen. Les principales sources mobilisées sont The International EPD System [57], ECO Platform [58], INIES [59], ÖKOBAUDAT [60]. Le recours à ces différentes bases permet de couvrir un large éventail de produits, de technologies de production et de contextes géographiques, tout en limitant les biais liés à l'utilisation d'une source unique.

Pour chaque DEP, les informations correspondant aux facteurs étudiés ont été extraites et regroupées dans une base de données dédiée. Les variables collectées comprennent notamment le type de produit, le procédé de fabrication, le type de four, le taux de matière secondaire, le pays de production, le PRP A1-A3, ainsi que les informations relatives à l'intensité carbone de l'électricité. Un extrait représentatif de cette base de données est présenté en Annexe E, tandis que les données complètes sont disponibles dans l'Annexe électronique<sup>1</sup>.

#### *Préparation et traitement des données manquantes*

Avant les analyses, les données ont fait l'objet d'une phase de préparation afin d'en garantir la cohérence et la comparabilité. Cette étape comprenait l'harmonisation des unités, le contrôle des valeurs aberrantes et des incohérences, ainsi que le traitement des données manquantes des variables telles que la quantité de matière secondaire et l'intensité carbone de l'électricité.

---

<sup>1</sup> Annexe électronique : <https://github.com/NaomiBioum/Memoire-de-master>

- **Matière secondaire**

Le taux de matière secondaire n'étant pas systématiquement renseigné dans les DEP collectées, les valeurs manquantes ont été estimées à l'aide d'un modèle de régression linéaire afin de préserver la taille et la représentativité de l'échantillon. La méthodologie adoptée est présentée à la section 3.3.2.

- **Intensité carbone de l'électricité**

L'intensité carbone de l'électricité utilisée pour produire l'acier a été relevée directement dans les DEP lorsqu'elle était disponible. En l'absence de cette information, les données ont été complétées à partir de la base Our World in Data [61], qui fournit des indicateurs harmonisés de l'intensité carbone des systèmes électriques nationaux. Cette démarche a permis d'assurer la cohérence des données pour l'ensemble des pays représentés dans l'échantillon.

### 3.3.2 Construction du modèle de régression

Cette section présente le développement du modèle de régression utilisé pour expliquer la variabilité observée des valeurs du PRP A1-A3 des produits en acier. Elle décrit les variables retenues, la construction du modèle, l'intégration des termes d'interaction, ainsi que la comparaison externe réalisée pour évaluer sa capacité prédictive.

#### *Variables du modèle*

Le PRP du module A1-A3 constitue la variable dépendante du modèle. Les variables explicatives retenues proviennent de la revue de littérature et des informations collectées dans les DEP détaillée à la section 3.3.1. Elles couvrent les principales caractéristiques susceptibles d'influencer les émissions associées à la production de l'acier. Il s'agit principalement de la technologie de production, l'utilisation de matières recyclées, l'intensité carbone de l'électricité et certaines opérations de transformation ou de finition.

Bien que la littérature scientifique identifie plusieurs facteurs déterminants du PRP de l'acier, les informations disponibles dans les DEP ne permettent pas de tous les intégrer au modèle. L'efficacité énergétique des fours, les technologies de CCS/CCUS, le type de four de réchauffement ou encore la source d'hydrogène n'ont pas pu être analysés dans cette étude. Le modèle a donc été construit à partir des variables suffisamment renseignées et comparables présentées ci-dessous.

Le Tableau 3 décrit l'ensemble des variables considérées lors du développement du modèle. La variable dépendante étant le PRP A1-A3 et les autres, les variables indépendantes ou explicatives.

**Tableau 3.** Variables considérées pour le développement du modèle de régression

| Variable            | Description                                              | Type         | Unité / Modalités                              |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|
| PRP A1-A3           | Potentiel de réchauffement planétaire du module A1-A3    | Continue     | Kg CO <sub>2</sub> e/kg d'acier                |
| Type de four        | Technologie de production de l'acier                     | Catégorielle | BOF, EAF, DRI                                  |
| Matière secondaire  | Teneur en matières secondaires                           | Continue     | kg/kg acier                                    |
| Mix électrique      | Intensité carbone de l'électricité du pays de production | Continue     | Kg CO <sub>2</sub> /kWh                        |
| Garanties d'origine | Utilisation de garanties d'origine                       | Dichotomique | Oui / Non                                      |
| Classes d'alliage   | Classe d'alliage de l'acier                              | Catégorielle | *Faiblement allié, fortement allié, inoxydable |
| Galvanisé           | Présence d'une galvanisation                             | Dichotomique | Oui / Non                                      |
| Revêtu              | Présence d'un revêtement                                 | Dichotomique | Oui / Non                                      |
| Recuit              | Présence d'un traitement de recuit                       | Dichotomique | Oui / Non                                      |

\*Acier faiblement allié :  $C \leq 0.05 \%$  ; acier fortement allié :  $C > 0.05 \%$  ; acier inoxydable :  $Cr \geq 0.105 \%$  ; où C désigne la teneur en carbone et Cr la teneur en chrome.

### **Construction du modèle**

L'effet des variables explicatives sur le PRP a été évalué au moyen d'une régression linéaire. Les coefficients ont été estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires (Ordinary Least Squares, OLS), qui consiste à minimiser l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle.

La forme générale du modèle estimé est présentée par l'équation (1) :

$$PRP_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \beta_3 X_{3,i} + \dots + \beta_k X_{k,i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

où  $PRP_i$  représente la valeur observée du PRP pour l'observation  $i$ ,  $\beta_0$  l'ordonnée à l'origine,  $\beta_k$  les coefficients associés aux variables explicatives  $X_k$ , et  $\varepsilon_i$  le terme d'erreur.

L'analyse a d'abord porté sur l'évaluation de l'effet individuel de chaque variable à travers des régressions simples. Elle a été suivie de la construction du modèle de régression multiple qui a été utilisé pour la pondération des valeurs de référence. La qualité des modèles a été évaluée à partir des indicateurs suivants :

- **Coefficient de régression ( $\beta$ )** : il mesure l'effet d'une variable explicative sur le PRP, en d'autres termes, la variation attendue du PRP associée à une augmentation d'une unité de la variable explicative, toutes les autres variables du modèle étant égales par ailleurs. Son signe indique le sens de la relation et sa valeur son ampleur.
- **Valeur p** : elle permet d'évaluer la significativité statistique du coefficient estimé. Dans cette étude, un effet est considéré comme statistiquement significatif lorsque sa valeur  $p < 0,05$ .
- **Coefficient de détermination ( $R^2$ )** : il représente la proportion de la variance du PRP expliquée par le modèle. Plus il est proche de 100 %, meilleur est le pouvoir explicatif du modèle.
- **Coefficient de détermination ajusté ( $R^2$  ajusté)** : il corrige le  $R^2$  en pénalisant des modèles pour l'ajout de variables qui n'augmentent pas le pouvoir explicatif du modèle.
- **Terme d'erreur ( $\epsilon$ )** : il représente l'influence des facteurs non observés ou non inclus dans le modèle, les imprécisions de mesure et les variations imprévisibles du PRP.
- **Résidus** : ils correspondent à la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Plus leur distribution est concentrée autour de zéro, meilleur est l'ajustement du modèle et plus la part de variabilité expliquée est importante.

### *Termes d'interactions*

Des termes d'interaction entre la technologie de production et l'intensité carbone de l'électricité ont également été intégrés au modèle. Le but est d'évaluer si l'effet de l'intensité carbone de l'électricité sur le PRP varie selon les procédés de fabrication. Cette approche tient compte de la plus forte dépendance des procédés EAF et DRI à l'électricité par rapport aux procédés BOF, et permet de déterminer si le modèle est capable de mettre en évidence l'effet de ces interactions.

Le modèle est ensuite comparé avec des données indépendantes d'un référentiel connu afin de tester sa capacité prédictive et ses limites dues aux biais éventuels.

### *Comparaison du modèle à une source externe*

Pour évaluer la capacité du modèle à reproduire des valeurs de référence indépendantes, une comparaison externe a été réalisée à partir des impacts publiés par la *WorldSteel Association* de trois scénarios de production représentatifs : BF-BOF, Scrap-EAF et DRI-EAF [62].

Les scénarios de production ont été reconstruits à partir des informations disponibles dans cette publication. La World Steel Association renseigne le procédé de production ainsi que le pourcentage de contenu recyclé (*scrap use*), mais ne fournit pas directement la quantité de matière secondaire (SM en kg/kg d'acier) utilisée dans le modèle de régression. Les valeurs de SM ont donc été estimées à partir d'une relation linéaire entre

le taux de matière secondaire et la variable SM. L'équation de régression ainsi que la figure illustrant cette relation sont présentées en Annexe C, et illustrée par la [Figure 14](#).

L'intensité carbone de l'électricité n'étant pas précisée pour les scénarios de la World Steel Association, une valeur de 0,27 kgCO<sub>2</sub>e/kWh, correspondant à la moyenne européenne issue de la source de données « Our World in Data » a été retenue. En l'absence d'informations complémentaires, les variables relatives aux garanties d'origine de l'électricité ainsi qu'aux caractéristiques du produit (revêtu, galvanisé et recuit) prennent la modalité « non » par défaut. Les hypothèses retenues pour le paramétrage des scénarios sont résumées dans le [Tableau 4](#).

Les valeurs de PRP prédites par le modèle ont ensuite été comparées aux valeurs publiées par la World Steel Association afin d'évaluer sa capacité à reproduire les émissions associées aux principales filières de production de l'acier.

**Tableau 4.** Hypothèses de comparaison du modèle aux données de la World Steel Association

| Source / scénarios                   | BF-BOF                                               | Scrap-EAF                                            | DRI-EAF                                              | Intensité carbone de l'électricité                |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Informations fournies par Worldsteel | Contenu recyclé : 10 %                               | Contenu recyclé : > 70 %                             | Contenu recyclé : < 30 %                             | Non précisée                                      |
| Hypothèses appliquées dans le modèle | SM = 0,22 kg/kg d'acier pour 10 % de Contenu recyclé | SM = 0,88 kg/kg d'acier pour 75 % de Contenu recyclé | SM = 0,37 kg/kg d'acier pour 25 % de Contenu recyclé | 0,27 kgCO <sub>2</sub> e/kWh, moyenne européenne* |

\*Source : Our World in Data

Le modèle de régression permet d'estimer le PRP de différents scénarios. Toutefois, pour construire des valeurs nationales, ces estimations doivent ensuite être reliées à la structure réelle de l'approvisionnement luxembourgeois.

### 3.4 Caractérisation des flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier

Une fois les facteurs de production identifiés, il est nécessaire d'examiner d'où provient l'acier utilisé dans les bâtiments au Luxembourg. Cette étape permet de relier les performances environnementales observées dans les DEP à la réalité du marché luxembourgeois et aux caractéristiques de production des pays fournisseurs. Cette section présente les différentes étapes de la collecte des données. Elle décrit l'identification des produits en acier et leur correspondance avec les codes du commerce international, ainsi que la collecte des informations relatives aux caractéristiques des systèmes de production des pays fournisseurs du Luxembourg.

## Chapitre 3: Méthodologie

Les données d'UN Comtrade sont organisées selon un Système harmonisé (HS) d'échanges internationaux de produits. Chacune des catégories de produits définies dans cette étude a été associée à un code HS correspondant le mieux aux produits identifiés dans cette étude afin de permettre l'identification des flux d'importation des différentes familles de produits d'acier étudiées. Les codes retenus sont présentés dans le Tableau 5.

**Tableau 5.** Correspondance entre les types de produits et les codes du système harmonisé

| Catégorie                  | Produits                | Code HS | Dénomination UN Comtrade                                                                                   |
|----------------------------|-------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produits structurels       | Sections, Profilés      | 7216    | Cornières, profilés et sections de fer ou d'acier non allié                                                |
| Produits d'armature        | Barres d'armature       | 7214    | Barres et tiges, laminées à chaud, en rouleaux enroulés de façon irrégulière, en fer ou en acier non allié |
| Autres produits d'armature | Treillis, grillages     | 7314    | Tissus (y compris les bandes sans fin), grillages, filets et clôtures, en fil de fer ou d'acier            |
| Produits tubulaires        | Tubes, tuyaux           | 7306    | Autres tubes, tuyaux et profilés creux en fer ou en acier                                                  |
| Produits stabilisation     | Palplanches             | 7301    | Palplanches en fer ou en acier, cornières, profilés et sections soudés                                     |
| Produits plats             | Tôles, bobines, plaques | 7208    | Produits laminés plats en fer ou en acier non allié, laminés à chaud, non plaqués ni revêtus               |

Toutefois, après avoir associé les produits étudiés à un ou plusieurs code HS (deux pour les produits d'armature), cette étape relève d'un choix qualitatif pouvant s'avérer ne pas être la solution la plus appropriée. L'étape suivante consiste à identifier les pays fournisseurs de l'acier au Luxembourg.

### *Estimation des parts de marché*

Les données relatives aux importations d'acier ont été extraites de la base UN Comtrade [63], qui fournit des statistiques harmonisées sur les échanges internationaux de marchandises. L'analyse couvre la période 2021-2025, afin d'obtenir une représentation des flux récents tout en limitant l'influence des variations observées sur une seule année. Les paramètres utilisés pour l'extraction des données sont présentés en Annexe B, [Tableau 10](#).

Les parts de marché ont été déterminées à partir des volumes d'importation cumulés sur l'ensemble de la période considérée. Pour les sections et les palplanches, qui font également l'objet d'une production au Luxembourg, les données ont été ajustées à la production nationale [64].

Afin de simplifier l'analyse, seuls les pays représentant plus de 1 % des importations totales ont été distingués individuellement. Les autres fournisseurs ont été regroupés dans une catégorie agrégée intitulée Rest of the World (RoW). Les données de parts de marché détaillées pour chaque type de produit sont présentées en Annexe B dans la [Figure 11](#).

### *Caractéristiques des systèmes de production des pays fournisseurs*

Les systèmes de production des principaux pays fournisseurs ont été caractérisés afin d'identifier les technologies utilisées pour produire l'acier exporté vers le Luxembourg. Les données ont été extraites de la base Global Iron and Steel Tracker (GIST) développée par Global Energy Monitor, qui recense les installations sidérurgiques mondiales et leurs caractéristiques de production [65].

Afin de garantir la cohérence avec la période étudiée, seules les installations susceptibles d'avoir contribué aux flux commerciaux observés entre 2021 et 2025 ont été retenues. Les capacités de production ont ensuite été agrégées afin d'estimer la répartition des technologies au sein de chaque pays fournisseur. Les installations produisant exclusivement de l'acier destiné à des secteurs autres que celui de la construction ont été exclues de l'analyse. Les caractéristiques détaillées des systèmes de production étudiés sont documentées en Annexe C.

La caractérisation des flux d'approvisionnement fournit ainsi les poids commerciaux et technologiques nécessaires pour pondérer l'impact des scénarios estimés par le modèle de régression en valeurs représentatives du marché luxembourgeois.

## **3.5 Construction de la méthodologie de pondération**

La méthodologie retenue pour établir les valeurs de référence nationales du PRP des produits en acier est décrite dans cette section. Elle comprend la définition des scénarios de production, la méthode de

pondération, les hypothèses de calcul et le traitement des données manquantes, ainsi que l'analyse des incertitudes associées aux résultats.

Les coefficients issus du modèle de régression détaillé dans la section 3.3.2 permettent d'estimer le PRP de différents scénarios de production. Afin d'obtenir des valeurs représentatives du marché luxembourgeois, ces résultats sont ensuite pondérés en fonction de la structure des approvisionnements.

Le calcul est réalisé en deux étapes. Dans un premier temps, les coefficients issus du modèle de régression sont appliqués aux différents scénarios de production afin d'estimer un  $PRP_{c,t,p}$  pour chaque combinaison de pays ( $c$ ), de technologie ( $t$ ) et de produit ( $p$ ). Ces impacts sont ensuite agrégés au niveau national en fonction de la répartition des capacités de production entre les technologies. Dans un second temps, les résultats obtenus pour chaque pays sont combinés à l'aide des parts de marché afin d'obtenir un indicateur représentatif du marché luxembourgeois. Les paramètres utilisés dans cette méthodologie sont présentés dans le [Tableau 6](#).

### 3.5.1 Définition des scénarios de production

Des scénarios de production ont été élaborés en combinant les informations relatives aux pays fournisseurs, aux technologies de production et aux différentes catégories de produits étudiées.

Chaque scénario est défini à partir du type de produit, du pays de production, de la technologie utilisée, du mix électrique national, de la teneur en matière secondaire et éventuellement de la présence de garanties d'origine ou de certains procédés de finition. Au total, 71 scénarios ont été construits grâce aux données de marché et des fours. L'ensemble des scénarios étudiés est présenté en Annexe B.

Tableau 6. Paramètres de pondération

| Paramètres    | Définition                                                               | Unité / interprétation         |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $c$           | Pays                                                                     | Pays fournisseurs              |
| $t$           | Technologie de production                                                | EAF,BOF,DRI                    |
| $p$           | Produit                                                                  | type de produit                |
| $PRP_{c,t,p}$ | PRP au niveau pays-technologie-produit donné par le modèle de régression | kgCO <sub>2</sub> e/kg d'acier |
| $K_{c,t,p}$   | Capacité de production d'une technologie                                 | Milliers de tonnes (Kt)        |
| $K_{c,p}$     | Capacité totale du pays pour un produit                                  | Milliers de tonnes (Kt)        |
| $w_{c,t,p}$   | Poids de la technologie                                                  | Part relative (0-1)            |
| $PRP_{c,p}$   | PRP moyen du pays pour un produit                                        | kgCO <sub>2</sub> e/kg d'acier |
| $MS_{c,p}$    | Part de marché du pays pour un produit                                   | %                              |
| $PRP_p$       | PRP final du produit au Luxembourg                                       | kgCO <sub>2</sub> e/kg d'acier |

Les valeurs de  $PRP_{c,t,p}$  estimées pour ces scénarios constituent les données d'entrée de la première étape de pondération qui consiste à prendre en compte les capacités technologiques dans chaque pays.

### 3.5.2 Pondération technologique

Les impacts estimés pour chaque scénario sont pondérés selon la part des différentes technologies dans la capacité de production nationale du produit considéré. Le poids de chaque technologie pour un type de produit est défini par l'équation (2):

$$W_{c,p,t} = \frac{K_{c,p,t}}{K_{c,p}} \quad (2)$$

Le PRP moyen du pays pour un produit est défini par l'équation (3) :

$$PRP_{c,p} = \sum W_{c,p,t} \times PRP_{c,t,p} \quad (3)$$

Cette étape permet d'intégrer l'hétérogénéité des systèmes de production nationaux en tenant compte des technologies utilisées (EAF, BOF ou DRI) et de leur importance relative dans la structure industrielle de chaque pays.

### 3.5.3 Pondération par les parts de marché

Les valeurs de  $PRP_{c,p}$  obtenues pour les différents pays sont ensuite agrégées à l'aide de leurs parts de marché  $MS_{c,p}$ , calculées à partir des données de commerce international et de la production nationale selon l'équation (4) :

$$PRP_p = \sum MS_{c,p} \times PRP_{c,p} \quad (4)$$

Cette seconde pondération permet de reproduire la structure réelle des approvisionnements en acier du Luxembourg. Le  $PRP_p$  obtenu représente ainsi une valeur moyenne pondérée des impacts des pays effectivement présents sur le marché luxembourgeois pour la catégorie de produit considérée. Il constitue un indicateur représentatif des conditions d'approvisionnement nationales plutôt que de la performance d'un producteur particulier.

### 3.5.4 Hypothèses et traitement des données manquantes

Des hypothèses ont été posées afin de combler le manque de données et les incohérences observées après la transposition des données des différentes bases, concernant les capacités des fours et les parts de marché.

### *Répartition des capacités des fours*

Certains fours recensés dans la base GIST produisent plusieurs catégories de produits d'acier. En l'absence d'informations permettant de distinguer la capacité dédiée à chaque produit, la capacité totale de l'installation a été répartie uniformément entre les différentes catégories produites. Pour une installation fabricant  $n$  catégories de produits, la capacité attribuée à chaque catégorie a été divisée par le nombre de catégories. Cette hypothèse permet de conserver l'intégralité des capacités recensées tout en évitant de surreprésenter les capacités des fours produisant plusieurs types de produits dans le calcul des poids technologiques.

### *Traitement de la catégorie RoW*

La catégorie RoW regroupe les pays dont la contribution individuelle est inférieure à 1 % des importations totales ainsi que les pays pour lesquels aucune installation de production n'a pu être identifiée dans la base GIST.

Les capacités de production et les types de fours associés à cette catégorie ont été estimés à partir des valeurs moyennes observées pour les 70 installations recensées dans la base GIST. Cette approche permet de représenter les fournisseurs non caractérisés individuellement à l'aide d'une structure de production moyenne, représentative de l'échantillon étudié, tout en limitant le recours à des hypothèses spécifiques à un pays. Les impacts correspondants sont ensuite pondérés selon la part de marché attribuée au RoW dans le calcul du PRP. Les valeurs de référence obtenues sont ensuite soumises à une analyse des incertitudes afin d'estimer les intervalles d'incertitudes associés aux prédictions du modèle.

### *Analyse des incertitudes par simulation de Monte Carlo*

Comme toute approche de modélisation, les estimations produites sont associées à un certain degré d'incertitude. Afin d'en évaluer la robustesse, une analyse d'incertitude a été réalisée à l'aide d'une simulation de Monte Carlo.

Au total, 1 000 itérations ont été effectuées en faisant varier les paramètres du modèle de régression selon leurs distributions d'incertitude. Les distributions obtenues ont permis de calculer la valeur moyenne, le coefficient de variation ainsi que les percentiles P5 et P95.

Cette analyse prend uniquement en compte l'incertitude liée aux coefficients du modèle de régression. Les incertitudes associées aux capacités de production des fours, aux parts de marché utilisées dans les calculs ainsi qu'aux choix méthodologiques et aux hypothèses de modélisation n'ont pas été considérées. Les résultats doivent donc être interprétés comme reflétant exclusivement l'incertitude statistique du modèle de régression.

### ***Implémentation sous Python***

L'ensemble des étapes, depuis la préparation des données jusqu'à la pondération et l'analyse des incertitudes a été automatisé sous Python version 3.14.4 [66]. Celui-ci assure successivement le remplissage des données manquantes, le calcul des coefficients du modèle de régression, l'exécution des scénarios ainsi que la pondération des différentes valeurs de référence nationales. Le code complet est disponible dans l'Annexe électronique<sup>2</sup> du mémoire.

La dernière étape de cette méthodologie consiste à évaluer l'influence de ces valeurs développées sur les résultats d'ACV à l'échelle du bâtiment.

### **3.6 Analyse de sensibilité à l'échelle du bâtiment**

L'analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence du choix des valeurs du PRP utilisées pour évaluer l'impact environnemental des produits en acier sur les résultats du carbone incorporé à l'échelle du bâtiment. Elle permet de comparer les valeurs de référence développées dans cette étude aux valeurs génériques issues des principales bases de données environnementales utilisées dans les pays voisins ainsi qu'aux valeurs retenues par [67].

Pour cette analyse, deux bâtiments de référence ont été retenus : un bâtiment de bureaux à structure métallique et un bâtiment de bureaux à structure en béton, développés par [67]. Les deux modèles sont issus de l'International Reference Building, généré à l'aide de l'outil Carbon Designer 3D de One Click LCA. Ils présentent des caractéristiques fonctionnelles identiques, avec une surface brute de plancher de 4 400 m<sup>2</sup>, une surface utile brute (*Gross Internal Floor Area*, GIFA) de 4 149 m<sup>2</sup> et une durée de vie de référence de 60 ans. Les deux variantes ne diffèrent que par leur système structurel, ce qui permet d'isoler l'influence des produits en acier sur les résultats du carbone incorporé.

#### **3.6.1 Calcul du carbone incorporé des bâtiments**

Les quantités de matériaux ont été extraites des inventaires détaillés de ces deux bâtiments de référence. Les produits en acier ont ensuite été identifiés puis reclassés selon les catégories retenues dans la présente étude, à savoir les produits structurels, les produits d'armature et les produits plats (les autres groupes de produits, à l'instar des treillis, tubes et palplanches, n'étaient pas présents dans les bâtiments de référence). Les autres matériaux des bâtiments de référence (verre, bois, finitions, etc.) ont été conservés inchangés

---

<sup>2</sup> Annexe électronique : <https://github.com/NaomiBioum/Memoire-de-master>

afin que les différences observées entre les scénarios soient exclusivement attribuables aux valeurs de PRP attribuées aux produits en acier.

Afin d'évaluer l'influence de la source des données environnementales, plusieurs scénarios ont été construits à partir de différentes bases de données. Outre les valeurs de référence proposées dans cette étude, les valeurs utilisées par [67] ainsi que les données génériques issues des bases INIES, ÖKOBAUDAT et TOTEM ont été considérées. Il s'agit des principales bases de données des pays voisins du Luxembourg ; dans le cas de l'Allemagne et de la France, ce sont également les principaux fournisseurs externes d'acier du Luxembourg.

Le carbone incorporé total du bâtiment (CI) est calculé en additionnant la contribution des produits en acier à celle de l'ensemble des autres matériaux, puis en rapportant cette somme à la surface utile brute (GIFA), conformément aux équations (5) et (6)

$$CI = \frac{CI_{acier} + CI_{autres\ matériaux}}{GIFA} \quad (5)$$

Avec :

$$CI_{acier} = \sum \text{masse} \times PRP \text{ du produit en acier} \quad (6)$$

$CI_{autres\ matériaux}$  : inchangé selon les données de [67]

### 3.6.2 Traitement des pénalisations

Les bases INIES et ÖKOBAUDAT appliquant des coefficients de pénalisation pour les données génériques, deux scénarios ont été étudiés pour chacune d'elles : l'un utilisant les valeurs génériques auxquelles des pénalités sont ajoutées et l'autre les valeurs non pénalisées qui ont été calculées en enlevant les coefficients de sécurité appliqués pour chacune de ces bases. L'objectif étant de pouvoir comparer les résultats avec des valeurs génériques sans pénalisation. La comparaison des résultats obtenus pour les scénarios non pénalisés est présentée en Annexe C, Figure 12 et Figure 13.

Pour les produits étudiés dans cette section, les FDES (Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire) de la base INIES décrivaient une pénalisation de 30 %, à laquelle on ajoute deux écarts-types de la moyenne des impacts des FDES (souvent deux ou trois) utilisées comme base pour établir la valeur générique. Dans la base ÖKOBAUDAT, une pénalisation forfaitaire de 20 % est appliquée aux valeurs par défaut du PRP A1-A3.

La description des matériaux comparés dans chacun des référentiels, les valeurs de carbone incorporé obtenues ainsi que le détail des calculs relatifs aux coefficients de pénalisation ainsi que les valeurs de PRP

retenues pour chaque catégorie de produits en acier sont fournies en Annexe C (Tableau 15, Tableau 16 et Tableau 17).

### **3.7 Conclusion**

Ce chapitre a décrit la méthodologie adoptée afin de développer des valeurs de référence nationales du PRP des produits en acier utilisés dans la construction au Luxembourg. Elle repose sur les données environnementales, commerciales et industrielles disponibles. Ces données ont été analysées afin de dépasser l'utilisation de valeurs génériques et de proposer une estimation tenant compte à la fois des caractéristiques des produits, des technologies de production et de la structure réelle des approvisionnements luxembourgeois. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 4: Résultats et discussion**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de la méthodologie développée au chapitre précédent. L'analyse débute par une description de la base de données des DEP et des principaux facteurs expliquant la variabilité du PRP A1-A3 des produits en acier. Ensuite, les résultats des modèles de régression sont présentés et comparés à une source externe, puis la structure des flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier est présentée. Les coefficients du modèle de régression et les flux d'approvisionnement sont ensuite utilisés pour établir des valeurs de référence nationales, dont les incertitudes sont évaluées avant d'analyser leur incidence sur le carbone incorporé de bâtiments de référence. Les résultats sont successivement discutés au regard de la littérature afin d'en apprécier la cohérence et les implications pour l'évaluation environnementale des bâtiments.

### **4.2 Description de la base de données des DEP**

#### ***Répartition géographique des DEP et des sites de production***

La base de données constituée rassemble 401 DEP et couvre un large éventail de sites de production sidérurgiques répartis à l'échelle mondiale. La Figure 2 montre la répartition géographique des sites de production et des DEP analysées par pays. Les points noirs représentent les sites de production, tandis que l'intensité de la couleur indique le nombre de DEP disponibles dans chaque pays. Il faut noter que le site de production n'était pas toujours identifié dans chaque déclaration.

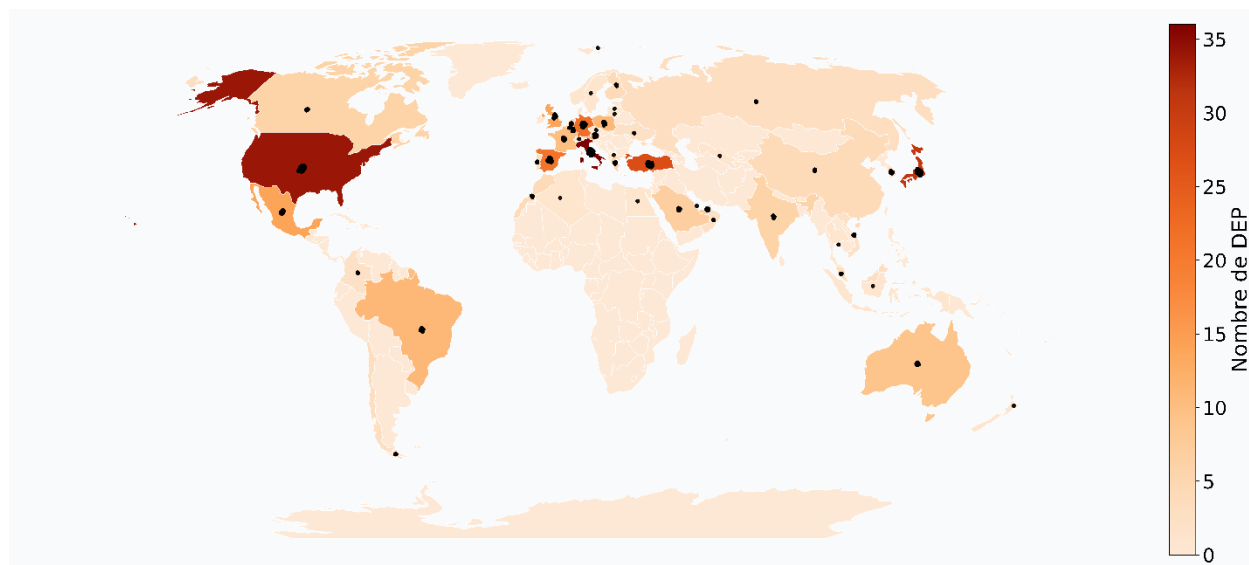


**Figure 2.** Répartition géographique des sites de production des DEP analysées

Selon la Figure 2, la base de données constituée présente une couverture globale, avec une forte concentration de sites en Allemagne, en Italie, en Espagne, en Turquie, au Royaume-Uni, aux États-Unis et au Japon. L'Europe constitue ainsi la principale région représentée. Les États-Unis regroupent le plus grand nombre de DEP (36). En revanche, la France qui figure parmi les pays fournisseurs au Luxembourg est très peu représentée ainsi que la Chine et l'Inde, ces derniers pourtant parmi les principaux producteurs mondiaux d'acier. Cette diversité géographique s'accompagne d'une représentation contrastée des procédés de fabrication et des caractéristiques des produits telles qu'on le voit à la [Figure 3](#).

### Description des variables

Les Figures (a-i) présentent la distribution des principales variables de l'échantillon de DEP analysé.

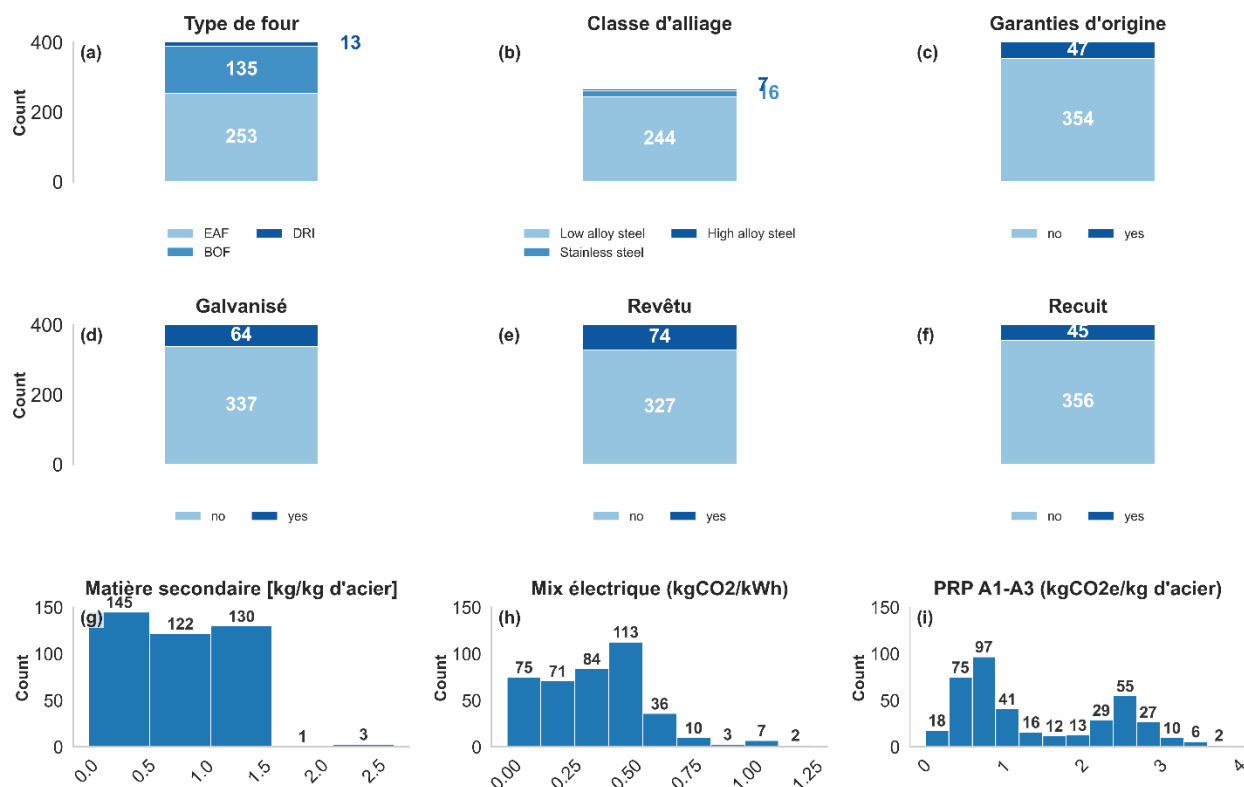


**Figure 3.** Distribution des variables catégorielles et continues de l'échantillon étudié

Les fours EAF représentent près des deux tiers de la base de données avec 253 DEP, tandis que la filière BOF représente près d'un tiers. La filière DRI est la moins représentée avec seulement 13 DEP conformément à la Figure 3 (a). La majorité des produits était des aciers faiblement alliés (244 DEP), devant les aciers inoxydables (16 DEP) et les aciers fortement alliés (7 DEP), un tiers des données d'alliage non mentionné dans les DEP (Figure 3 (b)). Les Figures 3 (c) à (f) montrent par ailleurs que les caractéristiques spécifiques, telles que les garanties d'origine de l'électricité, la galvanisation, les revêtements ou les procédés recuits, concernent une proportion relativement limitée des produits étudiés.

Concernant les variables continues, la Figure 3 (g) met en évidence une concentration des observations pour des taux de ferraille inférieurs à 1,5 kg/kg d'acier produit, avec seulement quelques valeurs extrêmes. La Figure 3 (h) révèle également une forte variabilité de l'intensité carbone de l'électricité des pays de production, témoignant de la diversité des contextes énergétiques représentés dans les DEP. Enfin, la

Figure 3 (i) présente une distribution asymétrique des valeurs de PRP du module A1-A3, témoignant d'une variabilité importante des émissions des différents produits en acier parmi les DEP analysées.

### Capacité explicative des variables

La Figure 4 présente les distributions des résidus des huit modèles de régression simple développés pour expliquer la variabilité du PRP A1-A3 de l'acier. Le modèle de référence (Figure 4 (a)) représente un modèle sans variable explicative, tandis que les Figures (b) à (h) présentent les modèles construits à partir de chacune des variables et illustrant les capacités explicatives individuelles de chacune d'elles.

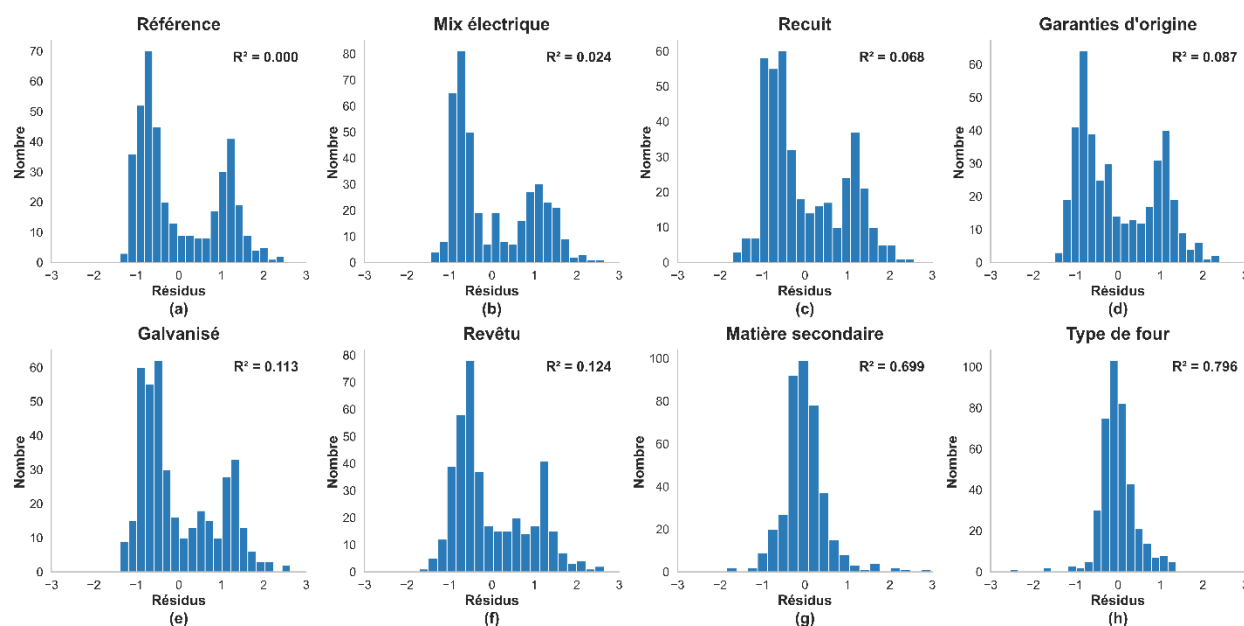


**Figure 4.** Capacité explicative des variables incluses dans le modèle

La Figure 4 (a) présente la distribution des résidus du modèle de référence ( $R^2 = 0$ ). Elle reflète la variabilité totale observée du PRP A1-A3 qui reste à expliquer. Les résidus correspondent à l'écart entre chaque observation et la moyenne de l'ensemble des observations.

Les figures 4 (c), (e) et (f) montrent respectivement les capacités explicatives des procédés de finition : recuit, galvanisé et revêtu. Les valeurs de  $R^2$  associées (environ 2,4 %, 11,3 % et 12,4 % respectivement) à ces modèles sont faibles et les distributions des résidus restent très proches de celle observée pour le modèle de référence. Ces résultats indiquent que les opérations de finition contribuent relativement peu à expliquer la variabilité du PRP A1-A3 observée dans l'échantillon étudié.

L'intensité carbone du mix électrique et les garanties d'origine (Figures 4 (b) et (d)) expliquent respectivement environ 2,4 % et 8,7 % de la variance observée. La dispersion des résidus reste toujours très

proche de celle du modèle de référence, indiquant que ces facteurs contribuent faiblement à l'explication de la variabilité observée.

Comme l'illustrent les Figures 4 (g) et (h), l'introduction de la teneur en matière secondaire et du type de four dans le modèle améliore significativement l'ajustement du modèle. Ces variables expliquent respectivement environ 70 % et 80 % de la variance observée du PRP A1-A3, respectivement. Ces deux variables présentent les coefficients de détermination les plus élevés et conduisent à une réduction marquée de la dispersion des résidus autour de zéro. Le resserrement progressif des distributions observé entre la Figure 4 (a) et les modèles les plus performants (Figures 4 (h) et (g)) montrent que la variabilité du PRP A1- A3 est principalement déterminée par les caractéristiques du procédé de production, en particulier la quantité de matière secondaire incorporée et le type de four utilisé. Les opérations de finition et les caractéristiques liés au mix électrique jouent un rôle secondaire en comparaison.

Dans l'ensemble, les résultats confirment que les facteurs liés au procédé de production constituent les principaux déterminants des émissions de GES associées à la production d'acier, tandis que les variables de finition n'expliquent qu'une faible part de la variabilité observée.

Ce résultat est partiellement cohérent comparé aux facteurs plus fréquemment cités dans la littérature. Selon Rossi et al., les performances de la filière EAF sont liées à la quantité et à la qualité de la ferraille [33], tandis que [48] montre que la qualité des intrants secondaires peut modifier sensiblement l'impact environnemental de l'acier. L'intensité carbone de l'électricité reste un facteur pertinent, mais son effet est subordonné à la filière. Selon [15], l'utilisation d'une électricité fortement décarbonée offrirait des réductions de PRP les plus significatives.

### 4.3 Résultats des modèles de régression

Cette section présente les résultats des deux modèles de régression développés. Le modèle principal suppose une sensibilité identique des différentes filières à l'intensité carbone de l'électricité, tandis que l'autre intègre des termes d'interaction afin de distinguer cet effet selon les différents types de four. Leurs performances et leurs coefficients sont présentés dans les Tableaux 7 à 9.

**Tableau 7.** Comparaison de la performance des modèles de régression

| Modèle                       | Nombre d'observations | Nombre de Paramètres | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> ajusté |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------|-----------------------|
| Sans interaction (principal) | 401                   | 9                    | 0,833          | 0,829                 |
| Avec interaction             | 401                   | 11                   | 0,836          | 0,831                 |

**Tableau 8.** Coefficients du modèle de régression principal sans termes d'interaction

| <b>Facteurs</b>                       | <b>Coefficients<br/>[kg CO2e/kg d'acier]</b> | <b>Erreur<br/>standard</b> | <b>Valeur p</b> |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| Constante<br>Référence(BOF)           | 2.4                                          | 0.06                       | 0.000           |
| EAF                                   | -1.28                                        | 0.09                       | 0.000           |
| DRI                                   | -0.57                                        | 0.12                       | 0.000           |
| Matière secondaire<br>[kg/kg d'acier] | -0.45                                        | 0.09                       | 0.000           |
| Garanties d'origine                   | -0.24                                        | 0.06                       | 0.000           |
| revêtu                                | 0.07                                         | 0.08                       | 0.38            |
| Recuit                                | 0.1                                          | 0.07                       | 0.128           |
| Galvanisé                             | 0.23                                         | 0.09                       | 0.009           |
| Mix électrique<br>(kgCO2/kWh)         | 0.33                                         | 0.09                       | 0.001           |

**Tableau 9.** Coefficients du modèle de régression avec termes d'interaction

| <b>Facteurs</b>                       | <b>Coefficients<br/>[kg CO2e/kg d'acier]</b> | <b>Erreur<br/>standard</b> | <b>Valeur p</b> |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| Constante<br>Référence(BOF)           | 2.45                                         | 0.07                       | 0.000           |
| EAF                                   | -1.36                                        | 0.12                       | 0.000           |
| DRI                                   | -1.30                                        | 0.30                       | 0.000           |
| Matière secondaire<br>[kg/kg d'acier] | -0.44                                        | 0.09                       | 0.000           |
| Garanties d'origine                   | -0.24                                        | 0.07                       | 0.000           |
| revêtu                                | 0.06                                         | 0.08                       | 0.464           |
| Recuit                                | 0.11                                         | 0.07                       | 0.114           |
| Galvanisé                             | 0.23                                         | 0.09                       | 0.006           |
| Mix électrique · EAF<br>(kgCO2/kWh)   | 0.38                                         | 0.13                       | 0.004           |
| Mix électrique ·<br>BOF(kgCO2/kWh)    | 0.19                                         | 0.14                       | 0.164           |
| Mix électrique ·<br>DRI(kgCO2/kWh)    | 1.74                                         | 0.57                       | 0.002           |

Comme le révèle le Tableau 7, le modèle principal explique 83,3 % de la variance observée du PRP A1-A3 de l'acier avec un  $R^2$  ajusté d'environ 83 %. Le Tableau 8 montre que le type de four, la teneur en matières secondaires, les garanties d'origine, la galvanisation et l'intensité carbone de l'électricité présentent des effets statistiquement significatifs. Ces variables expliquent donc réellement la variabilité observée du PRP A1-A3 de l'acier. Seuls les procédés de revêtement et recuit ne montrent pas d'effet clair avec des valeurs  $p$  statistiquement non significatives. Par rapport au BOF, un four EAF réduit les émissions de 1,28 kg CO<sub>2</sub>e/kg d'acier et le DRI de 0,57 kg CO<sub>2</sub>e/kg si tous les autres paramètres restent identiques. Une augmentation d'une unité de la teneur en matière secondaire est associée à une diminution de 0,45 kg CO<sub>2</sub>e/kg, tandis qu'une garantie d'origine est associée à une baisse de 0,24 kg CO<sub>2</sub>e/kg et un mix électrique carboné est associé à une augmentation d'environ 0,33 kg CO<sub>2</sub>e/kg. La galvanisation ajoute 0,23 kg CO<sub>2</sub>e/kg.

Le modèle avec termes d'interactions quant à lui présente une performance et un ajustement légèrement supérieurs à ceux du modèle principal, avec un  $R^2$  de 0,836 contre 0,833 et un  $R^2$  Ajustée de 0,831 contre 0,829 (tableau 7). Le Tableau 9 met en évidence une sensibilité contrastée des différentes filières au mix électrique. L'interaction entre l'intensité carbone de l'électricité et le type de four est significative pour le four EAF (augmente les impacts de 0,38 ; valeur  $p = 0,004$ ) et, plus fortement encore, pour le DRI (1,74 ; valeur  $p = 0,002$ ), mais pas pour le BOF (0,19 ; valeur  $p = 0,164$ ). L'ajout des termes d'interactions dans le modèle n'améliore pas systématiquement la significativité des autres coefficients. Compte tenu du faible gain explicatif obtenu, le modèle principal a finalement été retenu pour établir les valeurs nationales.

Ces résultats concordent avec la littérature qui identifie le type de four, la teneur en contenu recyclé et le mix électrique comme des déterminants majeurs du PRP de l'acier [14], [45]. La réduction des émissions associées au four EAF, au procédé DRI et aux matières secondaires s'explique par la diminution de l'usage du minerai de fer et des combustibles fossiles nécessaires au haut fourneau qui sont remplacés par la ferraille recyclée [17], [22]. À l'inverse, la galvanisation augmente les impacts en ajoutant une étape de transformation. L'absence d'effet significatif du revêtement et des procédés de recuit peut être due à leur faible représentation dans l'échantillon de même que dans la littérature. Ces procédés restent peu documentés voire exclus du périmètre de nombreuses études bien qu'ils puissent représenter une part non négligeable du PRP de l'acier notamment à travers l'utilisation d'énergie électrique et thermique [38].

### 4.3.1 Résultats de la comparaison du modèle vs Worldsteel Association

La [Figure 5](#) compare les valeurs des impacts de trois scénarios estimés grâce au modèle développé dans cette étude et le PRP des mêmes scénarios publiés par la Worldsteel Association. Les valeurs de Worldsteel sont en bleu foncé et les estimations du modèle en bleu clair. Les barres noires indiquent les intervalles de confiance des valeurs prédites liées au modèle de régression. Les hypothèses utilisées pour cette comparaison sont présentées dans le Tableau 4.

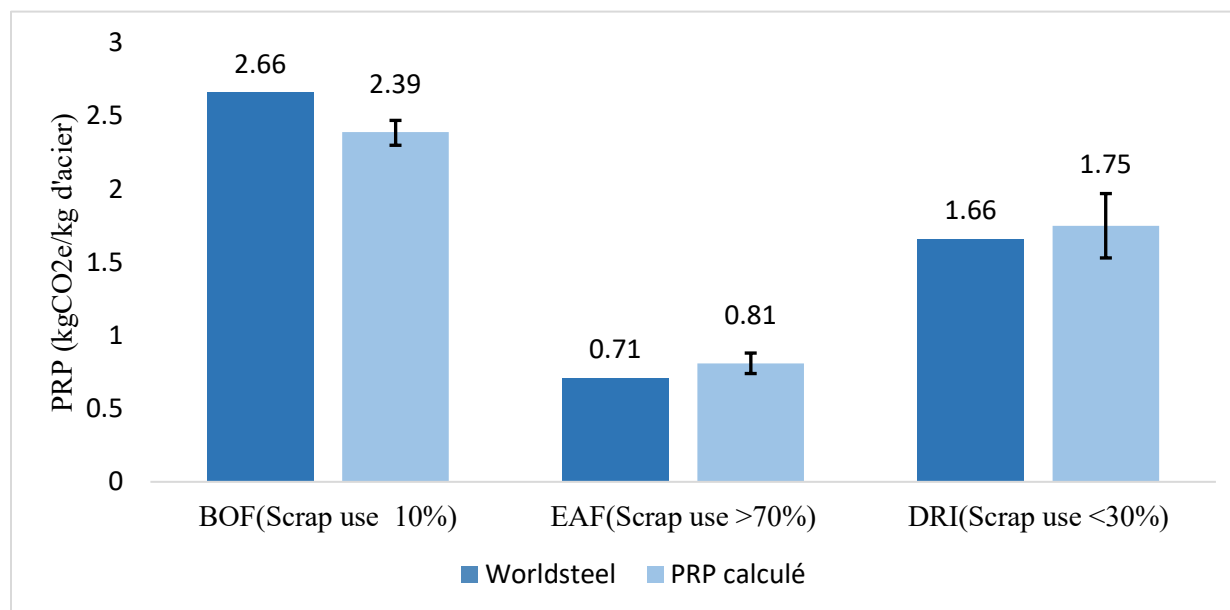


**Figure 5.** Comparaison des valeurs PRP de Worldsteel aux valeurs calculées

La [Figure 5](#) montre que comparé aux données de Worldsteel, le modèle sous-estime le PRP de la filière BOF d'environ 0,3 kg CO<sub>2</sub>e/kg d'acier, soit un écart supérieur à 10 % par rapport à la valeur de Worldsteel. À l'inverse, il surestime légèrement les filières EAF et DRI. Ainsi, pour les filières EAF et BOF, la valeur de Worldsteel se situe hors de l'intervalle de confiance des valeurs du modèle, tandis que, pour le DRI, elle est comprise dans l'intervalle estimé par le modèle.

La sous-estimation des impacts du scénario BOF pourrait notamment s'expliquer par la composition de l'échantillon, dominé par des DEP européennes et nord-américaines. Celui-ci n'est donc pas représentatif de la production mondiale, largement concentrée en Chine et en Inde selon les données de la Worldsteel Association [62]. Par ailleurs, le modèle n'intègre pas l'efficacité énergétique des fours, pourtant identifié dans la littérature comme un facteur déterminant du PRP de l'acier [23], [43]. Ces limites peuvent conduire à sous-estimer les performances des installations BOF moins efficaces et insuffisamment représentées dans l'échantillon étudié.

Concernant la filière EAF, l'écart observé entre les valeurs prédites et celles publiées par Worldsteel peut s'expliquer par les hypothèses retenues. Le modèle considère un taux de matière secondaire de 75 %, tandis que Worldsteel indique un taux supérieur à 70 %, sans en préciser la valeur exacte. Cette différence peut conduire le modèle à sous-estimer les bénéfices associés à une utilisation plus importante de ferraille et, par conséquent, à surestimer les impacts du scénario EAF. Cet écart peut également résulter du mix électrique retenu ou de différences méthodologiques entre les DEP et les données de Worldsteel. Cette interprétation rejoint la littérature, qui montre que le PRP de la filière EAF dépend fortement de la quantité et de la qualité de la ferraille ainsi que de l'intensité carbone de l'électricité [24], [52]. Enfin, la concordance obtenue pour la filière DRI est encourageante, mais elle ne suffit pas à démontrer la capacité d'ajustement du modèle. Cette filière n'est couverte que par 13 DEP dans l'échantillon étudié et ses performances varient fortement selon l'agent réducteur et la source d'énergie, deux paramètres qui ne sont pas explicitement intégrés au modèle [39], [53].

### 4.4 Flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier

La structure des approvisionnements en acier au Luxembourg varie fortement selon les familles de produits considérées. Les caractéristiques de production des pays fournisseurs diffèrent également entre les pays. La Figure 6 présente la répartition des principaux pays fournisseurs pour les six catégories de produits étudiées et les caractéristiques de production de ces pays, la largeur des flux est proportionnelle à la part représentée par chaque catégorie. La catégorie RoW est décrite dans la section 3.4.

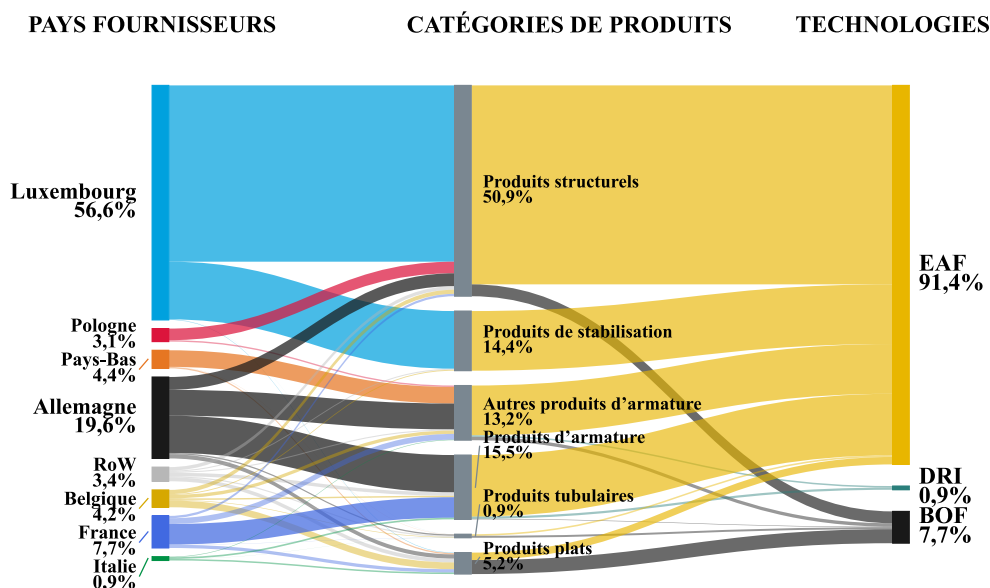


**Figure 6.** *Sankey diagram* : flux d'approvisionnement luxembourgeois de l'acier

La Figure 6 met en évidence une forte concentration européenne des approvisionnements du marché luxembourgeois. Le Luxembourg lui-même participe fortement à son proche marché avec 56,6 %, pour les six catégories de produits analysées, notamment en raison de la grande part de la production nationale des produits structurels et des produits de stabilisation. L'Allemagne représente environ 19,6 %, dont les parts de marché concernent surtout les deux catégories de produits d'armature (HS 7214 et HS 7314), ainsi que les produits structurels. La France et la Belgique représentent respectivement environ 7,7 % et 4,2 % du marché. Les Pays-Bas représentent environ 4,4 % du marché et fournissent principalement les produits d'armature. Vient ensuite la Pologne dont la part de marché de 3,1 % est dominée par les produits structurels. Puis par l'Italie qui a une part de marché plus réduite, tandis que le reste du marché (environ 3,4 %) provient des autres pays répartis dans le reste du monde et en Europe en particulier.

La filière EAF domine nettement le marché avec 91,4 % des flux, contre 7,7 % pour la filière BOF et 0,9 % pour la filière DRI. Les produits structurels, de stabilisation et les produits d'armature sont majoritairement associés aux fours EAF, tandis que les produits plats dépendent davantage des fours BOF. Les produits tubulaires très peu présents dans le marché luxembourgeois de l'acier dédié à la construction, notamment pour les codes inclus dans cette étude, présentent une mixité technologique liée à la fois aux fours BOF et EAF. Cette structure technologique suggère qu'il ne pourrait y avoir une valeur unique de PRP qui puisse correctement représenter l'ensemble des produits en acier.

Il faut noter que seuls six groupes de produits (correspondant à six codes HS) ont été analysés. Ainsi, les choix qualitatifs associant les produits aux codes HS ainsi que le périmètre restreint des produits influencent les résultats présentés à la Figure 6. Par ailleurs, les données sur la production nationale ne sont pas accessibles au public avec le même niveau de granularité ; il a donc fallu formuler des hypothèses pour répartir les parts entre les groupes de produits.

### 4.5 Valeurs de référence nationales obtenues

La Figure 7 présente les valeurs de référence nationales du PRP des six groupes de produits en acier étudiés ainsi que les intervalles d'incertitude P5-P95 obtenus à partir de 1000 simulations de Monte Carlo. Les violons illustrent la dispersion des résultats simulés autour de la moyenne représentée ici par un point. Les intervalles P5-P95 indiquent la plage dans laquelle se situent 90 % des résultats de simulations et permettent d'avoir le niveau d'incertitude (lié au modèle de régression) associé à chaque valeur de référence. CV désigne le coefficient de variation.

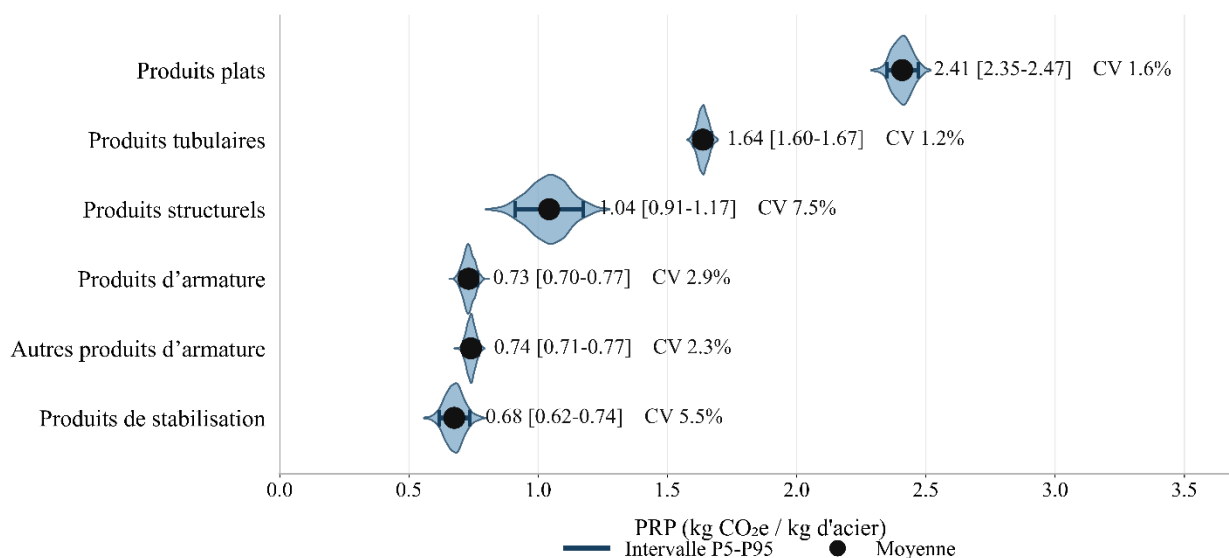


**Figure 7.** Valeurs de référence nationales obtenues et intervalles d'incertitude P5-P95

Les produits plats affichent la valeur la plus élevée, avec 2,41 kg CO<sub>2</sub>e/kg d'acier, suivis des produits tubulaires (1,64) et les produits structurels (1,04). Les autres produits d'armature (0,74), les produits d'armature (0,73) et les produits de stabilisation (0,68) présentent les valeurs les plus faibles. Ces résultats reflètent la structure des approvisionnements : les produits plats sont davantage associés à la filière BOF, tandis que les produits d'armature et de stabilisation proviennent majoritairement des fours EAF utilisant davantage de ferraille. La valeur intermédiaire des produits tubulaires traduit une combinaison plus équilibrée de ces deux filières.

Ces résultats concordent avec la littérature, qui situe généralement le PRP de la filière BF-BOF entre 1,6 et 2,5 kg CO<sub>2e</sub>/kg d'acier, contre environ 0,7 kg CO<sub>2e</sub>/kg pour l'EAF alimenté en ferraille [14]. Les performances de l'EAF restent toutefois fortement dépendantes de la quantité et de la qualité de la ferraille, ainsi que de l'intensité carbone de l'électricité [14], [48].

Les produits plats et tubulaires présentent les incertitudes relatives les plus faibles, avec des coefficients de variation respectifs de 1,6 % et 1,2 %. À l'inverse, les produits structurels affichent le coefficient le plus élevé (7,5 %), suivi des produits de stabilisation (5,5 %). Pour les produits structurels et de stabilisation, la forte concentration des approvisionnements luxembourgeois respectivement, 84 % et 97 % (cf. Figure 11) en provenance du Luxembourg limite l'effet de moyenne entre plusieurs pays et technologies. L'estimation des incertitudes pourrait donc dépendre davantage des paramètres associés au profil de production dominant. De plus, leur faible valeur moyenne augmente mécaniquement le coefficient de variation. Ces résultats ne traduisent ainsi pas nécessairement une plus grande variabilité réelle du marché, mais une plus forte incertitude relative de la prédiction statistique. Ces écarts rejoignent les travaux de Kankanamge et al., soulignant que la variabilité du PRP dépend à la fois des technologies, des données d'entrée et des hypothèses méthodologiques [13].

Ces intervalles doivent néanmoins être interprétés en tenant compte du fait qu'ils reflètent uniquement les incertitudes associées aux coefficients du modèle de régression. Les incertitudes liées aux parts de marché, aux capacités de production et au traitement des données manquantes ne sont pas intégrées. Leur prise en compte conduirait à des intervalles d'incertitude plus grands.

### 4.6 Résultats de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence des valeurs de PRP attribuées aux produits en acier sur le carbone incorporé des deux bâtiments de référence. Dans un premier temps, celui-ci est calculé à partir des six valeurs de référence établies dans cette étude. Le calcul est ensuite reproduit, pour les mêmes bâtiments et les mêmes quantités de matériaux, en utilisant les valeurs issues d'autres référentiels. Les Figures 8 et 9 comparent les résultats obtenus pour le bâtiment à structure en acier et le bâtiment à structure en béton armé, respectivement.

### *Influence de la source de données du PRP sur le bâtiment à structure en acier*

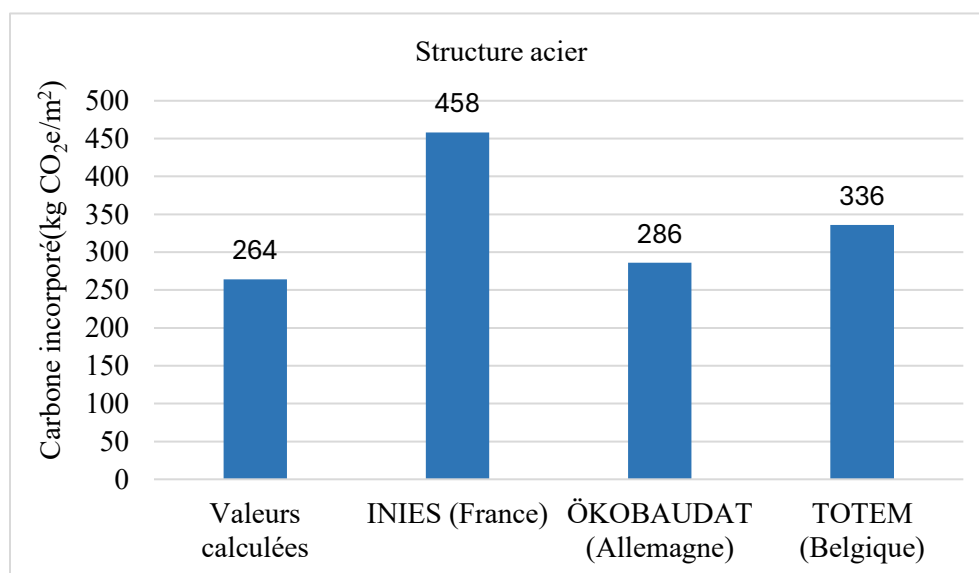


**Figure 8.** Variation du carbone incorporé du bâtiment à structure en acier selon la source des données du PRP de l'acier

Comme le montre la Figure 8, le carbone incorporé du bâtiment à structure métallique est estimé à 264 kg CO<sub>2</sub>e/m² avec les valeurs développées dans cette étude. L'utilisation des données génériques de ÖKOBAUDAT conduit à une valeur de 286 kg CO<sub>2</sub>e/m², soit un écart limité de 8 %. En revanche, l'utilisation des valeurs INIES augmente fortement le résultat, qui atteint 458 kg CO<sub>2</sub>e/m², soit près de 73 % de plus comparé au résultat obtenu avec les valeurs de référence calculées. Les données de la base belge TOTEM conduisent quant à elles à un résultat de 336 kg CO<sub>2</sub>e/m².

Ces écarts montrent que l'estimation du carbone incorporé d'un bâtiment à structure en acier est particulièrement sensible au choix du référentiel environnemental retenu pour caractériser le PRP des produits en acier.

### *Influence de la source de données du PRP sur le bâtiment à structure en béton armé*

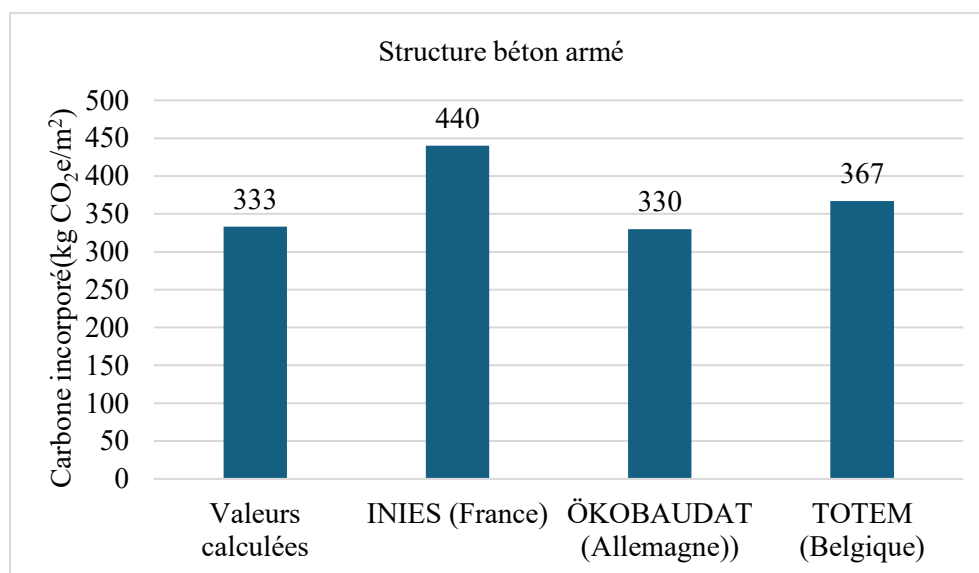


**Figure 9.** Variation du carbone incorporé du bâtiment à structure en béton selon la source des données du PRP de l'acier

Pour le bâtiment à structure en béton armé (Figure 9), le carbone incorporé calculé à partir des valeurs développées est de 333 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Les résultats obtenus avec ÖKOBAUDAT restent très proches de cette valeur (330 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>), tandis que les données TOTEM conduisent à 367 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. L'utilisation des valeurs INIES produit l'impact le plus élevé avec 440 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.

Bien que les écarts observés restent importants, ils sont moins marqués que pour le bâtiment à structure métallique. Cette différence s'explique par la proportion plus faible de l'acier dans le bâtiment en béton, où l'influence des produits sidérurgiques est partiellement compensée par la contribution des autres matériaux de construction. Néanmoins, le niveau de variation observé demeure significatif puisqu'il est principalement lié aux produits d'armature.

Les résultats mettent en évidence une cohérence entre les valeurs développées dans cette étude et celles de la base allemande ÖKOBAUDAT. Par ailleurs, les valeurs issues d'INIES conduisent systématiquement aux impacts les plus élevés, suivis par les valeurs de TOTEM.

Ces différences s'expliquent en partie par les méthodologies propres à chaque référentiel ainsi que par les pénalisations appliquées aux données génériques lorsque les caractéristiques des produits ne sont pas suffisamment documentées. L'analyse montre que l'effet de ces pénalisations peut avoir une influence plus importante sur les résultats de l'évaluation environnementale des bâtiments que certaines variations liées aux technologies de production ou aux caractéristiques des produits en acier eux-mêmes.

Les résultats montrent également que le choix du référentiel est particulièrement déterminant pour les bâtiments à structure métallique, où l'acier représente une part importante de la masse et de l'impact environnemental total. Ce constat rejoint les conclusions de [52], qui soulignent l'influence majeure des caractéristiques environnementales de l'acier sur l'empreinte carbone d'un bâtiment.

Les valeurs de référence établies dans cette étude ont été élaborées pour refléter autant que possible le marché luxembourgeois de l'acier. Lorsque les informations sur les produits ne sont pas disponibles, une pénalisation peut être appliquée à ces valeurs afin d'adopter une approche conservatrice. Ces résultats montrent que le choix du référentiel constitue une hypothèse méthodologique importante qui devrait être clairement documentée dans toute ACV de bâtiment.

### *Limites de l'étude*

**Qualité et homogénéité des données des DEP :** les valeurs de référence développées dans cette étude reposent sur les informations déclarées dans les DEP, dont la qualité et le niveau de détail varient significativement. Des incertitudes subsistent en raison de données parfois manquantes, de différences dans les modes de déclaration et de certains choix méthodologiques qui varient d'un producteur à un autre. Ces différences concernent notamment la teneur en matières secondaires qui présente parfois des incohérences ainsi que la caractérisation de l'électricité utilisée. Certaines DEP déclarant le mix électrique physique, d'autres le mix résiduel ou encore une électricité associée à des garanties d'origine. La robustesse du modèle demeure ainsi dépendante de la qualité et de la cohérence des données déclarées.

**Choix de modélisation :** le modèle de régression ne prend pas explicitement en compte certains paramètres reconnus dans la littérature comme influençant le PRP de l'acier, tels que l'efficacité énergétique des fours, la composition chimique des produits en acier. L'intégration de ces facteurs pourrait améliorer le modèle dans la mesure où des données fiables expliquant ces facteurs sont disponibles.

**Hypothèses liées aux parts de marché :** la construction des valeurs de référence repose sur plusieurs hypothèses concernant la répartition des capacités de production entre les différentes catégories de produits ainsi que le traitement des installations produisant plusieurs catégories d'acier. Ces hypothèses influencent les pondérations attribuées aux différentes technologies et introduisent une incertitude supplémentaire dans les résultats.

**Production nationale estimative :** certaines données utilisées pour caractériser les approvisionnements et la production nationale restent approximatives. De même, la catégorie « Rest of the World » (RoW) regroupe des pays présentant des profils de production potentiellement différents. Les valeurs proposées

doivent dès lors être considérées comme une estimation représentative du marché luxembourgeois plutôt qu'une description exhaustive.

**Analyse des incertitudes** : l'analyse des incertitudes réalisée dans cette étude porte uniquement sur les coefficients du modèle de régression. Elle n'intègre pas les incertitudes associées aux parts de marché, aux capacités de production ni aux hypothèses retenues pour compléter les données manquantes. L'incertitude globale des valeurs de référence est donc vraisemblablement sous-estimée.

**Représentativité géographique** : les DEP analysées proviennent majoritairement d'Europe et d'Amérique du Nord. Cette répartition est cohérente avec l'objectif de l'étude et avec les sources d'approvisionnement du marché luxembourgeois, ce qui confère une bonne représentativité aux résultats dans ce contexte. En revanche, certains grands pays producteurs notamment la Chine et l'Inde sont sous-représentés, ce qui limite la portée des résultats à l'échelle mondiale.

### 4.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'identifier les principaux facteurs expliquant la variabilité du PRP des produits en acier. Les analyses réalisées montrent que l'impact carbone des produits sidérurgiques dépend principalement de la filière de production mobilisée et de la quantité de matières secondaires incorporées. Les produits majoritairement issus de la filière EAF, tels que les armatures et les produits de stabilisation, présentent les impacts les plus faibles, tandis que les produits plats, davantage associés à la filière BOF, affichent les valeurs les plus élevées.

Le modèle de régression développé explique 83,3 % de la variabilité observée dans les 401 DEP analysées. Malgré certaines limites statistiques et des écarts de prédiction observés, il constitue un outil pertinent pour caractériser les tendances du marché, structurer l'analyse des déterminants du PRP et établir des valeurs de référence adaptées au contexte luxembourgeois. Les six facteurs d'émission obtenus, compris entre 0,68 et 2,41 kg CO<sub>2</sub>e/kg d'acier selon la famille de produits considérée, reflètent la diversité des chaînes d'approvisionnement et des technologies de production mobilisées.

L'analyse de sensibilité appliquée aux deux bâtiments de référence met par ailleurs en évidence l'influence déterminante de la source de données environnementale sur les résultats d'ACV. Cet effet est particulièrement marqué pour le bâtiment à structure en acier, dont le carbone incorporé varie fortement selon le référentiel utilisé. Les valeurs développées dans cette étude restent toutefois cohérentes avec celles issues d'ÖKOBAUDAT malgré les pénalisations appliquées. En revanche, les données génériques des référentiels INIES appliquant des pénalisations différentes, et TOTEM conduisent à des estimations beaucoup plus élevées.

Ces résultats soulignent l'intérêt de disposer de valeurs de référence nationales afin de mieux représenter les spécificités du marché luxembourgeois. Ils montrent également que le choix du référentiel constitue une hypothèse méthodologique majeure dans l'évaluation environnementale des bâtiments. La pénalisation appliquée aux valeurs génériques confirme davantage cette nécessité d'établir des valeurs de référence nationales. D'un référentiel à un autre, les résultats des évaluations environnementales pour un même bâtiment et les mêmes matériaux varient significativement. Enfin, compte tenu des incertitudes associées aux données et aux hypothèses de modélisation, l'utilisation de ces valeurs gagnerait à être accompagnée d'un coefficient de sécurité adapté au marché et aux objectifs climatiques européens.

Malgré les limites identifiées, cette étude fournit une première base méthodologique pour la définition de facteurs d'émission représentatifs du marché luxembourgeois de l'acier de construction. L'intégration future d'un plus grand nombre de DEP provenant des principaux pays producteurs, ainsi que de variables décrivant la composition chimique des produits et l'efficacité des fours, permettrait de renforcer la robustesse du modèle et d'améliorer la précision des valeurs proposées.

## Chapitre 5: Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif de développer des valeurs de référence nationales du potentiel de réchauffement planétaire de l'acier structurel représentatives du marché luxembourgeois. Pour y parvenir, une méthodologie combinant les données des DEP, les flux d'approvisionnement et les caractéristiques de production des pays fournisseurs a été proposée. L'enjeu était d'établir des valeurs de référence capables de refléter plus fidèlement l'approvisionnement réel et les technologies mobilisées pour le marché luxembourgeois.

Les résultats montrent que le type de four utilisé et la quantité de matière secondaire incorporée constituent les principaux déterminants du PRP de l'acier. Le modèle de régression développé explique 83 % de la variabilité observée du PRP A1-A3 de l'acier dans les 401 DEP analysées. Les valeurs de référence obtenues sont comprises entre 0,68 kg CO<sub>2</sub>e/kg et 2,41 kg CO<sub>2</sub>e/kg d'acier produit selon la catégorie de produit en acier.

L'étude met également en évidence l'influence significative du choix du référentiel constituant la source de données du PRP de l'acier sur les résultats de l'ACV des bâtiments, particulièrement pour les bâtiments à structure en acier. Ces résultats soulignent ainsi l'intérêt de disposer de valeurs de référence nationales afin de réduire les écarts liés à l'utilisation de données génériques et d'accroître la robustesse des évaluations environnementales des bâtiments.

Malgré les limites liées aux données disponibles et aux hypothèses de modélisation, ce mémoire propose une méthodologie permettant d'établir des facteurs d'émission nationaux de l'acier de construction. Dans un contexte de décarbonation progressive de la sidérurgie et de renforcement des exigences environnementales dans le secteur du bâtiment, il fournit une base méthodologique pouvant soutenir le développement des futures exigences relatives au carbone incorporé dans le secteur de la construction au Luxembourg.

## Références

- [1] « The Paris Agreement - Publication | UNFCCC ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://unfccc.int/documents/184656>
- [2] International Energy Agency (IEA), « Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking », IEA, Paris, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron\\_and\\_Steel\\_Technology\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)
- [3] C. Davis, Z. Li, P. Styring, R. Curry, et P. J. Holliman, « Routes to reducing emissions from steel production », *Nat. Rev. Clean Technol.*, vol. 1, n° 12, p. 890-902, déc. 2025, doi: 10.1038/s44359-025-00118-1.
- [4] H. Y. Sohn, *Flash Ironmaking*, 1<sup>re</sup> éd. Boca Raton: CRC Press, 2023. doi: 10.1201/9781003342199.
- [5] H. Y. Sohn, D.-Q. Fan, et A. Abdelghany, « Design of Novel Flash Ironmaking Reactors for Greatly Reduced Energy Consumption and CO2 Emissions », *Metals*, vol. 11, n° 2, p. 332, févr. 2021, doi: 10.3390/met11020332.
- [6] L. F. Cabeza *et al.*, « Buildings », in *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, et J. Malley, Éd., Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022, p. 953-1048. doi: 10.1017/9781009157926.011.
- [7] *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, ISO 14040:2006, 2006. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [8] *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, ISO 14044:2006, 2006. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [9] *Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures*, ISO 14025:2006, 2006. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/38131.html>
- [10] « CSN EN 15804+A2 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products », <https://www.en-standard.eu>. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.en-standard.eu/csn-en-15804-a2->

- sustainability-of-construction-works-environmental-product-declarations-core-rules-for-the-product-category-of-construction-products/
- [11] SPF Économie, « Règlement (UE) 2024/3110 sur les produits de construction ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://economie.fgov.be/fr/themes/entreprises/secteurs-specifiques/construction/produits-de-construction/reglement-ue-20243110-sur-les>
  - [12] « Energy Performance of Buildings Directive ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)
  - [13] N. S. Kankanamge Dona, A. Arias, F. Donati, S. Cucurachi, et R. Kleijn, « Hydrogen and biomass-based carbon source integration for iron and steel manufacturing: A systematic review of Life Cycle Assessment studies », *Open Res. Eur.*, vol. 5, p. 196, 2025, doi: 10.12688/openreseurope.20725.1.
  - [14] J. Suer, M. Traverso, et N. Jäger, « Review of Life Cycle Assessments for Steel and Environmental Analysis of Future Steel Production Scenarios », *Sustainability*, vol. 14, n° 21, p. 14131, oct. 2022, doi: 10.3390/su142114131.
  - [15] B. Kazmi, S. A. A. Taqvi, et D. Juchelková, « State-of-the-art review on the steel decarbonization technologies based on process system engineering perspective », *Fuel*, vol. 347, p. 128459, sept. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128459.
  - [16] H. Gervásio et L. S. da Silva, « Decarbonisation of steel production by the low-carbon DRI-EAF route », *ce/papers*, vol. 6, n° 3-4, p. 509-513, 2023, doi: 10.1002/cepa.2687.
  - [17] L. Holappa, « A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry », *Metals*, vol. 10, n° 9, p. 1117, août 2020, doi: 10.3390/met10091117.
  - [18] T. Liang *et al.*, « Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution », *J. Clean. Prod.*, vol. 264, p. 121697, août 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121697.
  - [19] J. Suer, F. Ahrenhold, et M. Traverso, « Carbon Footprint and Energy Transformation Analysis of Steel Produced via a Direct Reduction Plant with an Integrated Electric Melting Unit », *J. Sustain. Metall.*, vol. 8, n° 4, p. 1532-1545, déc. 2022, doi: 10.1007/s40831-022-00585-x.
  - [20] C. Lu *et al.*, « Life cycle assessment of carbonaceous pellets used in blast furnaces in the context of “double carbon” », *Sci. Total Environ.*, vol. 935, p. 173274, juill. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173274.
  - [21] A. S. Leão, D. L. Medeiros, M. A. Santiago, A. O. do Carmo Tavares, H. L. Maranduba, et E. dos S. Almeida, « Rigorous environmental and energy life cycle assessment of blast furnace pig iron in Brazil: The role of carbon and iron sources, and co-product utilization », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 36, p. e00607, juill. 2023, doi: 10.1016/j.susmat.2023.e00607.

- [22] M. Buyle, B. Maes, S. Van Passel, K. Boonen, A. Vercalsteren, et A. Audenaert, « Ex-ante LCA of emerging carbon steel slag treatment technologies: Fast forwarding lab observations to industrial-scale production », *J. Clean. Prod.*, vol. 313, p. 127921, sept. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127921.
- [23] S. Alyarahma, I. P. Sari, et W. Kurniawan, « Environmental Impact Assessment of Steel Production in Indonesia : A Case Study », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1203, n° 1, p. 012044, juin 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1203/1/012044.
- [24] R. X. Zou et E. N. Mayfield, « Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Raw Steel Production Plants in the US », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 60, n° 2, p. 1759-1768, 2026, doi: 10.1021/acs.est.5c01504.
- [25] M. Gérardin et S. Ferrière, « Décarbonation de l'acier et des métaux de base : envoyons les bons signaux », *Note Anal. Fr. Strat.*, p. 1-19, avr. 2025.
- [26] F. Li *et al.*, « Thermodynamic performance analysis and environmental impact assessment of an integrated system for hydrogen generation and steelmaking », *Energy*, vol. 241, p. 122922, févr. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122922.
- [27] F. Li *et al.*, « Quantifying the energy saving potential and environmental benefit of hydrogen-based steelmaking process: Status and future prospect », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 211, p. 118489, juill. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118489.
- [28] C. Weckenborg, Y. Graupner, et T. S. Spengler, « Prospective assessment of transformation pathways toward low-carbon steelmaking: Evaluating economic and climate impacts in Germany », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 203, p. 107434, avr. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107434.
- [29] A. Nurdiawati, I. N. Zaini, W. Wei, R. Gyllenram, W. Yang, et P. Samuelsson, « Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process », *J. Clean. Prod.*, vol. 393, p. 136262, mars 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136262.
- [30] D.-A. Chisalita, L. Petrescu, P. Cobden, H. A. J. (Eric) van Dijk, A.-M. Cormos, et C.-C. Cormos, « Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO<sub>2</sub> capture and storage using the LCA methodology », *J. Clean. Prod.*, vol. 211, p. 1015-1025, févr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.256.
- [31] L. Ren, S. Zhou, et X. Ou, « The carbon reduction potential of hydrogen in the low carbon transition of the iron and steel industry: The case of China », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 171, p. 113026, janv. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113026.
- [32] S. Du, « Life Cycle Assessment of a New Steel-making Process for Sustainable Steel Industrial Development in China », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1699, n° 1, p. 012005, nov. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1699/1/012005.

- [33] F. Rossi, M. Niero, et M. Frey, « Application of LCA to circular economy strategies in steelmaking industry: state-of-the-art and recommendations », présenté à XVIII Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA, Pescara, Italy.
- [34] L. Zacharopoulos, I. Wiemer, M. Sprecher, et J. Geldermann, « Carbon Footprint of Alloyed Crude Steel in Germany: Focusing the Influence of Different Alloying Recipes », *J. Sustain. Metall.*, vol. 11, n° 3, p. 2393-2410, sept. 2025, doi: 10.1007/s40831-025-01111-5.
- [35] V. Shatokha, « A Study on the Potential of Carbon Dioxide Utilization Through its Co-Injection with Hydrogen into the Blast Furnace Tuyeres », *Steel Res. Int.*, vol. 95, n° 11, p. 2300397, 2024, doi: 10.1002/srin.202300397.
- [36] W. Liang *et al.*, « Life cycle assessment of blast furnace ironmaking processes: A comparison of fossil fuels and biomass hydrochar applications », *Fuel*, vol. 345, p. 128138, août 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128138.
- [37] A. Cardarelli et M. Barbanera, « Substitution of Fossil Coal with Hydrochar from Agricultural Waste in the Electric Arc Furnace Steel Industry: A Comprehensive Life Cycle Analysis », *Energies*, vol. 16, n° 15, p. 5686, juill. 2023, doi: 10.3390/en16155686.
- [38] T. E. Fente et A. A. Tsegaw, « Environmental impact assessment of steel reinforcing bar manufacturing process from scrap materials using life cycle assessment method: a case study on the Ethiopian metal industries », *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, n° 2, p. 53, févr. 2024, doi: 10.1007/s42452-024-05709-4.
- [39] G. S. Santos et C. E. Velasquez, « Decarbonizing the steel industry: a case study in Brazil utilizing nuclear-renewable hybrid energy systems for electricity and hydrogen supply », *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 27, n° 13, p. 9287-9309, déc. 2025, doi: 10.1007/s10098-025-03286-7.
- [40] C. Harpprecht *et al.*, « Future environmental impacts of global iron and steel production », *Energy Environ. Sci.*, vol. 18, n° 16, p. 8009-8028, 2025, doi: 10.1039/D5EE01356A.
- [41] J. Salami-Jaji, « Life Cycle Assessment of the transition of steelmaking towards hydrogen-based operation ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.doria.fi/handle/10024/189986>
- [42] C. Harpprecht, T. Naegler, B. Steubing, A. Tukker, et S. Simon, « Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study », *J. Clean. Prod.*, vol. 380, p. 134846, déc. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134846.
- [43] F. Kaiser, T. Reichel, T. Echterhof, D. Mier, I. Unamuno, et H. Pfeifer, « Decreasing the environmental impact of the electric steel making process through implementation of furnace retrofitting solutions », *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1309, n° 1, p. 012009, mai 2024, doi: 10.1088/1757-899X/1309/1/012009.

- [44] M. Simoni *et al.*, « Towards the Circularity of the EU Steel Industry: Modern Technologies for the Recycling of the Dusts and Recovery of Resources », *Metals*, vol. 14, n° 2, p. 233, févr. 2024, doi: 10.3390/met14020233.
- [45] L. Ren, S. Zhou, T. Peng, et X. Ou, « A review of CO<sub>2</sub> emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, p. 110846, juin 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110846.
- [46] S. Durga, S. Speizer, et J. Edmonds, « The role of the iron and steel sector in achieving net zero U.S. CO<sub>2</sub> emissions by 2050 », *Energy Clim. Change*, vol. 5, p. 100152, déc. 2024, doi: 10.1016/j.egycc.2024.100152.
- [47] Y. Huang, J. Chen, Y. Liu, et J. E, « Life cycle assessment of a process integrating supercritical water gasification with direct reduced iron production », *J. Clean. Prod.*, vol. 483, p. 144250, déc. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144250.
- [48] M. Haupt, C. Vadenbo, C. Zeltner, et S. Hellweg, « Influence of Input-Scrap Quality on the Environmental Impact of Secondary Steel Production », *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, n° 2, p. 391-401, 2017, doi: 10.1111/jiec.12439.
- [49] L. Li, Y. Jiang, S.-Y. Pan, et T.-C. Ling, « Comparative life cycle assessment to maximize CO<sub>2</sub> sequestration of steel slag products », *Constr. Build. Mater.*, vol. 298, p. 123876, sept. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123876.
- [50] A. Bonoli, A. Degli Esposti, et C. Magrini, « A Case Study of Industrial Symbiosis to Reduce GHG Emissions: Performance Analysis and LCA of Asphalt Concretes Made With RAP Aggregates and Steel Slags », *Front. Mater.*, vol. 7, p. 572955, déc. 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.572955.
- [51] I. García Gutiérrez, C. Pina, R. Tobajas, et D. Elduque, « Incorporating composition into life cycle assessment of steel grades », *J. Clean. Prod.*, vol. 472, p. 143538, sept. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143538.
- [52] H. Gervasio, L. S. da Silva, et M. D'Antimo, « The contribution of low carbon steel to the decarbonization of the building sector », in *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, CRC Press, 2023.
- [53] G. Zang *et al.*, « Cost and Life Cycle Analysis for Deep CO<sub>2</sub> Emissions Reduction for Steel Making: Direct Reduced Iron Technologies », *Steel Res. Int.*, vol. 94, n° 6, p. 2200297, 2023, doi: 10.1002/srin.202200297.
- [54] A. Bhaskar, M. Assadi, et H. N. Somehsaraei, « Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen », *Energies*, vol. 13, n° 3, p. 758, févr. 2020, doi: 10.3390/en13030758.

- [55] J. Liu, X. Yang, Y. Hou, Y. He, J. J. Pak, et I. El-Mahallawi, « CO2 emission reduction in a new BF–IF–BOF steelmaking process », *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 32, n° 8, p. 2334-2345, août 2025, doi: 10.1007/s42243-025-01457-w.
- [56] G. Andersson, A. Ponzio, A. Gauffin, H. Axelsson, et G. Nilson, « Sustainable steel production – Swedish initiative to ‘close the loop’ », *Miner. Process. Extr. Metall.*, vol. 126, n° 1-2, p. 81-88, mars 2017, doi: 10.1080/03719553.2016.1274550.
- [57] « EPD International », EPD International. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.environdec.com/home>
- [58] ECO Platform, « New ECO Portal ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://eco-portal.eco-platform.org/>
- [59] INIES, « Consultation de la base INIES ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://base-inies.fr/consultation/recherche>
- [60] ÖKOBAUDAT, « ÖKOBAUDAT Database ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/datenbank/suche.html](https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html)
- [61] « Lifecycle carbon intensity of electricity », Our World in Data. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>
- [62] « World Steel in Figures 2025 », worldsteel.org. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/>
- [63] « UN Comtrade ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://comtradeplus.un.org/>
- [64] « Steel production | Luxembourg (1970–2024) – Data, Charts & Analysis ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://statbase.org/data/lux-steel-production/>
- [65] Global Energy Monitor, « Global Iron and Steel Tracker ». Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-iron-steel-tracker>
- [66] Python Software Foundation, *Python*. (avril 2026). Python Software Foundation. Consulté le: 10 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.python.org/>
- [67] G. El Hajoui, « Life Cycle Assessment of Structural Systems: A Comparative Study of Embodied Carbon and Energy in Steel and Concrete Office Buildings », Master’s thesis, University of Luxembourg, Luxembourg, 2025.

### *Utilisation de l'intelligence artificielle*

Dans le cadre de ce mémoire, des outils d'intelligence artificielle et des logiciels numériques ont été utilisés comme supports techniques et rédactionnels. Microsoft Copilot a été utilisé pour assister la création et la correction du code Python ayant servi à effectuer les calculs et à produire les graphiques. DeepL a été employé comme aide à la traduction, Zotero pour la gestion des références bibliographiques, et Microsoft Copilot pour améliorer le style et résumer certains passages.

## Annexes

### Annexe A: Processus de sélection des articles fondée sur le cadre PRISMA

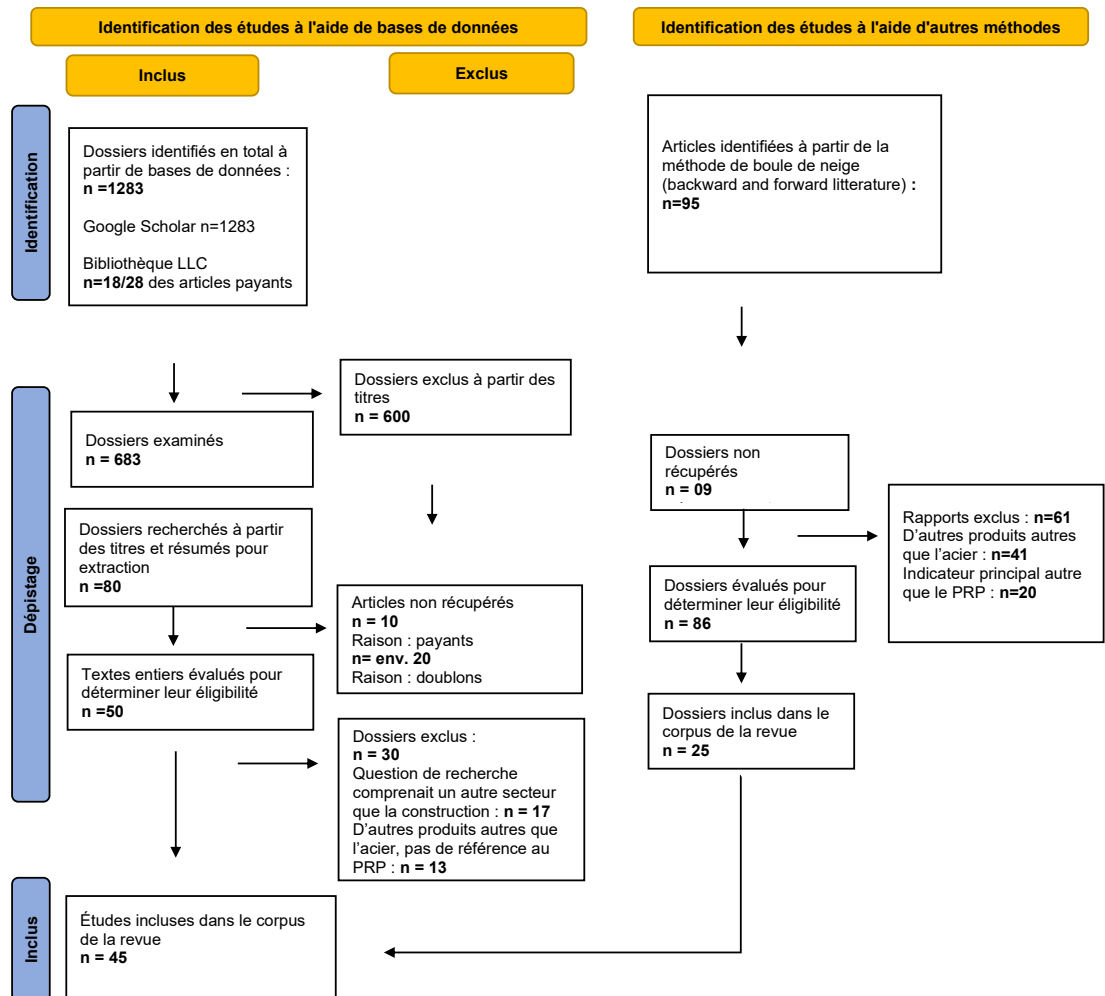


Figure 10. Procédure de sélection des articles fondée sur le cadre PRISMA

## Annexe B: Données des flux d'approvisionnement de l'acier

Tableau 10. Paramètres de collecte des données UN Comtrade

| Paramètres            | Valeur                        |
|-----------------------|-------------------------------|
| Type de produit       | Goods                         |
| Fréquence             | Annual                        |
| Classification        | HS (as reported)              |
| Reporter              | Luxembourg                    |
| Trade flow            | Imports                       |
| Partenaires           | All                           |
| Deuxième partenaire   | World                         |
| Période               | 2021-2025                     |
| Mode de transport     | Total modes of transport      |
| Procédures douanières | Total customs procedure codes |
| Unité                 | Quantité (kg)                 |

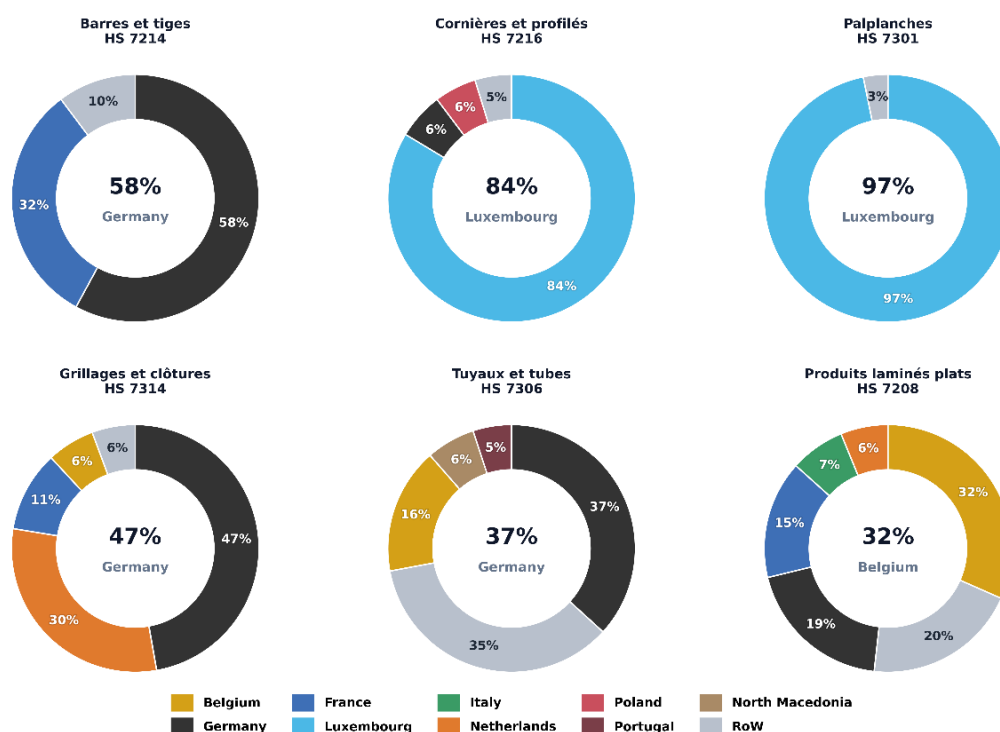


Figure 11. Parts de marché des différents groupes de produits en acier au Luxembourg

**Tableau 11.** Parts de marché pour les différentes catégories de produit selon les données COMTRADE

| <b>Code</b> | <b>Pays fournisseurs</b> | <b>Parts de marché %</b> | <b>Product group</b>       |
|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 7314        | Germany                  | 47%                      | Autres Produits d'armature |
| 7314        | Pays-Bas                 | 30%                      | Autres Produits d'armature |
| 7314        | France                   | 11%                      | Autres Produits d'armature |
| 7314        | Belgique                 | 6%                       | Autres Produits d'armature |
| 7314        | Pologne                  | 3%                       | Autres Produits d'armature |
| 7314        | RoW                      | 2%                       | Autres Produits d'armature |
| 7314        | Italie                   | 1%                       | Autres Produits d'armature |
| 7214        | Germany                  | 58%                      | Produits d'armature        |
| 7214        | France                   | 32%                      | Produits d'armature        |
| 7214        | RoW                      | 3%                       | Produits d'armature        |
| 7214        | Italie                   | 3%                       | Produits d'armature        |
| 7214        | Belgique                 | 2%                       | Produits d'armature        |
| 7214        | Spain                    | 2%                       | Produits d'armature        |
| 7216        | Germany                  | 6%                       | Produits structurels       |
| 7216        | Pologne                  | 6%                       | Produits structurels       |
| 7216        | Belgique                 | 2%                       | Produits structurels       |
| 7216        | RoW                      | 2%                       | Produits structurels       |
| 7216        | France                   | 1%                       | Produits structurels       |
| 7216        | Luxembourg               | 84%                      | Produits structurels       |
| 7301        | Belgique                 | 1%                       | Produits de stabilisation  |
| 7301        | RoW                      | 2%                       | Produits de stabilisation  |
| 7301        | Luxembourg               | 97%                      | Produits de stabilisation  |
| 7306        | Germany                  | 37%                      | Produits tubulaires        |
| 7306        | RoW                      | 22%                      | Produits tubulaires        |
| 7306        | Belgique                 | 16%                      | Produits tubulaires        |
| 7306        | Macédonie du Nord        | 6%                       | Produits tubulaires        |
| 7306        | Portugal                 | 5%                       | Produits tubulaires        |
| 7306        | France                   | 5%                       | Produits tubulaires        |
| 7306        | Pays-Bas                 | 5%                       | Produits tubulaires        |
| 7306        | Italie                   | 2%                       | Produits tubulaires        |
| 7306        | Luxembourg               | 2%                       | Produits tubulaires        |
| 7208        | Belgique                 | 32%                      | Produits plats             |
| 7208        | Germany                  | 19%                      | Produits plats             |
| 7208        | France                   | 15%                      | Produits plats             |
| 7208        | RoW                      | 14%                      | Produits plats             |
| 7208        | Italie                   | 7%                       | Produits plats             |
| 7208        | Pays-Bas                 | 6%                       | Produits plats             |
| 7208        | Slovaquie                | 4%                       | Produits plats             |
| 7208        | Luxembourg               | 2%                       | Produits plats             |

Tableau 12. Données d'estimation de la consommation nationale

| Code HS | Groupe de produits         | Consommation nationale | Pays fournisseur | Part de marché | Masse correspondante |
|---------|----------------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------------|
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | LUX              | 0.836130765    | 624302841.6          |
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | DEU              | 0.060942445    | 45503099.82          |
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | POL              | 0.055095906    | 41137741.02          |
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | BEL              | 0.019882971    | 14845758.1           |
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | RoW              | 0.016728847    | 12490709.72          |
| 7216    | Produits structurels       | 746656944.2            | FRA              | 0.011219067    | 8376793.941          |
| 7301    | Produits de stabilisation  | 211253147.9            | LUX              | 0.966981436    | 204277872.4          |
| 7301    | Produits de stabilisation  | 211253147.9            | RoW              | 0.017765424    | 3753001.817          |
| 7301    | Produits de stabilisation  | 211253147.9            | BEL              | 0.015253139    | 3222273.667          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | DEU              | 0.472217274    | 91491247.34          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | NLD              | 0.303461265    | 58795074.16          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | FRA              | 0.105298427    | 20401380.73          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | BEL              | 0.062493794    | 12108060.15          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | POL              | 0.026174612    | 5071284.064          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | RoW              | 0.019797454    | 3835721.148          |
| 7314    | Autres produits d'armature | 193748201.2            | ITA              | 0.010557175    | 2045433.603          |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | DEU              | 0.579314981    | 131983630            |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | FRA              | 0.318167441    | 72487153.25          |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | RoW              | 0.031722894    | 7227333.738          |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | ITA              | 0.026225148    | 5974798.485          |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | BEL              | 0.022502197    | 5126609.42           |
| 7214    | Produits d'armature        | 227827062              | ESP              | 0.022067339    | 5027537.027          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | DEU              | 0.367703132    | 4704010.969          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | RoW              | 0.218485895    | 2795081.023          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | BEL              | 0.164750512    | 2107646.497          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | MKD              | 0.064137324    | 820506.135           |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | PRT              | 0.050373022    | 644419.9835          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | FRA              | 0.048362683    | 618701.7998          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | NLD              | 0.045758861    | 585391.217           |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | ITA              | 0.021673108    | 277263.1797          |
| 7306    | Produits tubulaires        | 12792958.67            | LUX              | 0.018755463    | 239937.8676          |
| 7208    | Produits plats             | 76016785.5             | BEL              | 0.316039021    | 24024270.46          |

| Code HS | Groupe de produits | Consommation nationale | Pays fournisseur | Part de marché | Masse correspondante |
|---------|--------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------------|
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | DEU              | 0.194414282    | 14778748.78          |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | FRA              | 0.154294494    | 11728971.42          |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | RoW              | 0.142025765    | 10796342.14          |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | ITA              | 0.071586687    | 5441789.841          |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | NLD              | 0.061866129    | 4702864.29           |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | SVK              | 0.036737763    | 2792686.616          |
| 7208    | Produits plats     | 76016785.5             | LUX              | 0.023035859    | 1751111.946          |

Tableau 13. Données des technologies (GIST)

| Country     | Steel product                                                                   | Furnace type | Capacity (Kt) | Product type                                        |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------------------------------|
| Hungary     | profile, cold rolled, coated, hot rolled                                        | BOF          | 1600          | Produits structurels                                |
| Slovakia    | tinplate, galvanized, sheet, strip, coated, pipe, cold rolled, coil, hot rolled | BOF          | 4500          | Produits mixtes (plat/tubulaire)                    |
| Netherlands | slab, coil, strip, coated                                                       | BOF          | 7500          | Produits plats                                      |
| Belgium     | wire rod, rebar, mesh, billet                                                   | EAF          | 800           | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Belgium     | rolled, bar, slab, coil                                                         | EAF          | 850           | Produits mixtes (armature / plat)                   |
| Belgium     | pipe, billet, rail, slab                                                        | BOF          | 5200          | Produits mixtes (tubulaire / structurel)            |
| Poland      | wire rod, sections, strip, billet, slab, tube                                   | BOF          | 5001          | Produits mixtes (tubulaire / structurel / armature) |
| Poland      | rebar, beam, bar                                                                | EAF          | 1220          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Poland      | ingot, bar, hot rolled                                                          | EAF          | 500           | Produits d'armature                                 |
| Poland      | plate                                                                           | EAF          | 840           | Produits plats                                      |
| Poland      | rod, coil, angle, bar                                                           | EAF          | 1700          | Produits mixtes (armature / structurel / plats)     |
| France      | billet, rebar                                                                   | EAF          | 700           | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| France      | rebar, mesh, billet, coil, wire                                                 | EAF          | 720           | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| France      | billet, rebar                                                                   | EAF          | 550           | Produits d'armature                                 |
| France      | billet, rolled                                                                  | EAF          | 1200          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| France      | billet, rebar                                                                   | EAF          | 700           | Produits structurels                                |
| France      | billet, coil, rebar, wire                                                       | EAF          | 850           | Produits mixtes (armature / structurel)             |

## Annexes

| Country | Steel product                                             | Furnace type | Capacity (Kt) | Product type                                        |
|---------|-----------------------------------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------------------------------|
| France  | slab, coil, hot rolled                                    | BOF          | 6750          | Produits plats                                      |
| France  | slab, coil, hot rolled                                    | BOF          | 2550          | Produits plats                                      |
| France  | slab, coil, hot rolled                                    | BOF          | 2550          | Produits plats                                      |
| Germany | pipe, billet, bars, rebar                                 | EAF          | 1400          | Produits mixtes (armature / structurel / tubulaire) |
| Germany | billet, wire rod, rebar, bar                              | EAF          | 2500          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Germany | billet, wire rod, rebar, bar                              | EAF          | 1250          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Germany | billet, sections                                          | EAF          | 1100          | Produits structurels                                |
| Germany | shapes, wire rod, rod, mesh, billet, bar, coil            | EAF          | 1400          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Germany | billet, wire rod, rebar, mesh, bars                       | EAF          | 1800          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Germany | beam, sections                                            | EAF          | 1000          | Produits structurels                                |
| Germany | square, billet, forged                                    | EAF          | 600           | Produits structurels                                |
| Germany | cord, rebar, mesh, billet, wire, rod                      | EAF          | 1100          | Produits d'armature                                 |
| Germany | cord, rebar, mesh, billet, wire, rod                      | DRI          | 600           | Produits d'armature                                 |
| Germany | sheet, plate, strip, electrical, coated                   | BOF          | 9000          | Produits plats                                      |
| Germany | galvanized, plate, coated, cold rolled, hot rolled, slab  | BOF          | 2400          | Produits plats                                      |
| Germany | structural, plate                                         | BOF          | 2760          | Produits plats                                      |
| Germany | galvanized, cold rolled, coated, hot rolled, sheet        | BOF          | 5200          | Produits plats                                      |
| Germany | cold rolled, coil, coated, hot rolled, galvanized, sheet  | BOF          | 3960          | Produits plats                                      |
| Spain   | sheet, plate, cold rolled, coil, billet, hot rolled, slab | EAF          | 1200          | Produits plats                                      |
| Spain   | rebar, bar, billet, round bar, angle                      | EAF          | 1300          | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Spain   | billet, coil, rebar                                       | EAF          | 600           | Produits mixtes (armature / structurel)             |
| Spain   | square, rod, wire, sections                               | EAF          | 2500          | Produits structurels                                |
| Spain   | rebar, sections, bar                                      | EAF          | 500           | Produits d'armature                                 |
| Spain   | sections, bloom, billet, blanks, profile                  | EAF          | 1450          | Produits structurels                                |
| Spain   | rod, coil, rebar                                          | EAF          | 700           | Produits d'armature                                 |
| Spain   | rolled, bar                                               | EAF          | 740           | Produits d'armature                                 |
| Spain   | coil, flat                                                | EAF          | 2000          | Produits plats                                      |
| Spain   | rebar, bar, billet, coil, tube                            | EAF          | 1000          | Produits d'armature                                 |
| Spain   | wire rod, sections, bar                                   | EAF          | 750           | Produits d'armature                                 |
| Spain   | wire rod, rail, plate                                     | BOF          | 1200          | Produits mixtes (armature / plat)                   |

## Annexes

| Country    | Steel product                                       | Furnace type | Capacity (Kt) | Product type                               |
|------------|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------------------------------------|
| Spain      | galvanized, coil, plate, flat                       | BOF          | 4200          | Produits plats                             |
| Luxembourg | beam, sections                                      | EAF          | 1350          | Produits structurels                       |
| Luxembourg | piling, sections, beams, angle                      | EAF          | 1250          | Produits mixtes (stabilisation/structurel) |
| Luxembourg | piling                                              | EAF          | 1000          | Produits de stabilisation                  |
| Italy      | billet, rebar                                       | EAF          | 500           | Produits d'armature                        |
| Italy      | billet, rebar                                       | EAF          | 700           | Produits d'armature                        |
| Italy      | sheet, strip, cold rolled, coil, hot rolled, forged | EAF          | 1450          | Produits plats                             |
| Italy      | billet, rod, rolled                                 | EAF          | 600           | Produits d'armature                        |
| Italy      | ingot, bloom, billet, rolled, forged                | EAF          | 1500          | Produits structurels                       |
| Italy      | coil, rebar, mesh                                   | EAF          | 2200          | Produits d'armature                        |
| Italy      | billet                                              | EAF          | 600           | Produits structurels                       |
| Italy      | billet, wire rod, round bar, bar                    | EAF          | 600           | Produits mixtes (armature / structurel)    |
| Italy      | beam, sections, bar                                 | EAF          | 1200          | Produits mixtes (armature / structurel)    |
| Italy      | coil, rebar, mesh, wire rod                         | EAF          | 1250          | Produits d'armature                        |
| Italy      | billet                                              | EAF          | 600           | Produits structurels                       |
| Italy      | billet, rebar                                       | EAF          | 2000          | Produits d'armature                        |
| Italy      | billet, wire rod, wire, rolled                      | EAF          | 650           | Produits mixtes (armature / structurel)    |
| Italy      | billet, wire rod, round bar, bar                    | EAF          | 540           | Produits mixtes (armature / structurel)    |
| Italy      | bloom, billet                                       | EAF          | 780           | Produits structurels                       |
| Italy      | pipe, tube, flat                                    | BOF          | 7800          | Produits mixtes (plat/tubulaire)           |
| Portugal   | rebar, pipe                                         | EAF          | 600           | Produits mixtes (armature/tubulaire)       |
| Portugal   | coil, wire, mesh, bar                               | EAF          | 1100          | Produits d'armature                        |
| Portugal   | rod, coil, rebar                                    | EAF          | 700           | Produits d'armature                        |

Tableau 14. Description des scénarios construits

| <b>Product group</b> | <b>Country</b> | <b>Furnace</b> | <b>SM [kg/kg Steel]</b> | <b>Country CI or residual (kgCO2/kWh)</b> | <b>GoO</b> | <b>Galvanised</b> | <b>Coated</b> | <b>Annealed</b> |
|----------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Produits d'armature  | Belgium        | EAF            | 1.116                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Belgium        | BOF            | 0.239                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Poland         | BOF            | 0.239                   | 0.59                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Poland         | EAF            | 1.116                   | 0.59                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Germany        | EAF            | 1.116                   | 0.33                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Germany        | DRI            | 0.245                   | 0.33                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Germany        | BOF            | 0.239                   | 0.33                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Spain          | EAF            | 1.116                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Spain          | BOF            | 0.239                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Italy          | EAF            | 1.116                   | 0.46                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | RoW            | EAF            | 1.116                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | RoW            | BOF            | 0.239                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Portugal       | BOF            | 0.239                   | 0.46                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | Portugal       | EAF            | 1.116                   | 0.46                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | France         | EAF            | 1.116                   | 0.04                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits d'armature  | France         | BOF            | 0.239                   | 0.04                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits structurels | Germany        | BOF            | 0.188                   | 0.33                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Germany        | DRI            | 0.193                   | 0.33                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Germany        | EAF            | 1.019                   | 0.33                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | France         | BOF            | 0.188                   | 0.04                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | France         | EAF            | 1.019                   | 0.04                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Luxembourg     | EAF            | 1.019                   | 0.12                                      | no         | yes               | no            | no              |

## Annexes

| <b>Product group</b> | <b>Country</b> | <b>Furnace</b> | <b>SM [kg/kg Steel]</b> | <b>Country CI or residual (kgCO2/kWh)</b> | <b>GoO</b> | <b>Galvanised</b> | <b>Coated</b> | <b>Annealed</b> |
|----------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Produits structurels | Italy          | EAF            | 1.019                   | 0.46                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Italy          | BOF            | 0.188                   | 0.46                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Poland         | BOF            | 0.188                   | 0.59                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Poland         | EAF            | 1.019                   | 0.59                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Belgium        | BOF            | 0.188                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Belgium        | EAF            | 1.019                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Hungary        | BOF            | 0.188                   | 0.16                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Spain          | BOF            | 0.188                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | Spain          | EAF            | 1.019                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | RoW            | BOF            | 0.188                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits structurels | RoW            | EAF            | 1.019                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Spain          | EAF            | 0.946                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Spain          | BOF            | 0.199                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Italy          | EAF            | 0.946                   | 0.46                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Italy          | BOF            | 0.199                   | 0.46                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Germany        | EAF            | 0.946                   | 0.33                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Germany        | BOF            | 0.199                   | 0.33                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Poland         | EAF            | 0.946                   | 0.59                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Poland         | BOF            | 0.199                   | 0.59                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Slovakia       | BOF            | 0.199                   | 0.09                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Portugal       | EAF            | 0.946                   | 0.13                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Portugal       | BOF            | 0.199                   | 0.13                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires  | Belgium        | EAF            | 0.946                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |

## Annexes

| <b>Product group</b>      | <b>Country</b> | <b>Furnace</b> | <b>SM [kg/kg Steel]</b> | <b>Country CI or residual (kgCO2/kWh)</b> | <b>GoO</b> | <b>Galvanised</b> | <b>Coated</b> | <b>Annealed</b> |
|---------------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Produits tubulaires       | Belgium        | BOF            | 0.199                   | 0.15                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires       | RoW            | EAF            | 0.946                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits tubulaires       | RoW            | BOF            | 0.199                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits de stabilisation | Luxembourg     | EAF            | 1.071                   | 0.12                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits de stabilisation | RoW            | EAF            | 1.071                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits de stabilisation | RoW            | BOF            | 1.071                   | 0.27                                      | no         | no                | no            | no              |
| Produits plats            | Hungary        | BOF            | 0.179                   | 0.16                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Slovakia       | BOF            | 0.179                   | 0.09                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Netherlands    | BOF            | 0.179                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Netherlands    | EAF            | 1.001                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Poland         | EAF            | 1.001                   | 0.59                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Poland         | BOF            | 0.179                   | 0.59                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | France         | EAF            | 1.001                   | 0.04                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | France         | BOF            | 0.179                   | 0.04                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Germany        | BOF            | 0.179                   | 0.33                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Germany        | EAF            | 1.001                   | 0.33                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Spain          | EAF            | 1.001                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Spain          | BOF            | 0.179                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Belgium        | BOF            | 0.424                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Italy          | EAF            | 1.001                   | 0.46                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Belgium        | EAF            | 1.001                   | 0.15                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Italy          | BOF            | 0.179                   | 0.46                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Portugal       | BOF            | 0.179                   | 0.13                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | Portugal       | EAF            | 1.001                   | 0.13                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | RoW            | EAF            | 1.001                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |
| Produits plats            | RoW            | BOF            | 0.179                   | 0.27                                      | no         | yes               | no            | no              |

**Annexe C: Données de l'analyse de sensibilité à l'échelle du bâtiment**

Les Tableaux 15 et 16 décrivent les produits selon leur appellation dans les différentes bases de données exploitées pour réaliser l'analyse de sensibilité dont les résultats sont présentés à la section 4.6. Le Tableau 17 présente les PRP des différentes bases de données comparées dans l'analyse de sensibilité.

**Tableau 15.** Description des produits des différentes bases de données utilisées pour l'analyse de sensibilité

| Type de produit | Dénomination                                                              | Unités | Base      | PRP A1-A3 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) par défaut | PRP A1-A3 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) par défaut (sans pénalité) |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Plat            | Steel sheet hot dip galvanized (2-20mm); 2-20 mm                          | 1kg    | ÖKOBAUDAT | 2.74                                          | 2.29                                                          |
| Structurel      | Galvanized steel profile (blast furnace route, low scrap content)         | 1kg    | ÖKOBAUDAT | 2.92                                          | 2.44                                                          |
| Armature        | Reinforcement steel wire; wire                                            | 1kg    | ÖKOBAUDAT | 0.64                                          | 0.54                                                          |
| Plat            | Bardage en acier simple                                                   | 1kg    | INIES     | 5.25                                          | 2.84                                                          |
| Structurel      | Élément porteur en acier utilisé comme élément de charpente               | 1kg    | INIES     | 3.52                                          | 1.82                                                          |
| Armature        | Acier de ferrailage                                                       | 1kg    | INIES     | 3.54                                          | 0.90                                                          |
| Plat            | Plaque profilée   Acier (0.75 mm)   Vissé                                 | 1kg    | TOTEM     | 2.90                                          | /                                                             |
| Structurel      | Section carrée   Acier galvanisé (90x90 mm-t = 3 mm)                      | 1kg    | TOTEM     | 2.19                                          | /                                                             |
| Armature        | Treillis   Armatures en acier (150x150 Ø 5 mm)   A combiner avec du béton | 1kg    | TOTEM     | 1.62                                          | /                                                             |

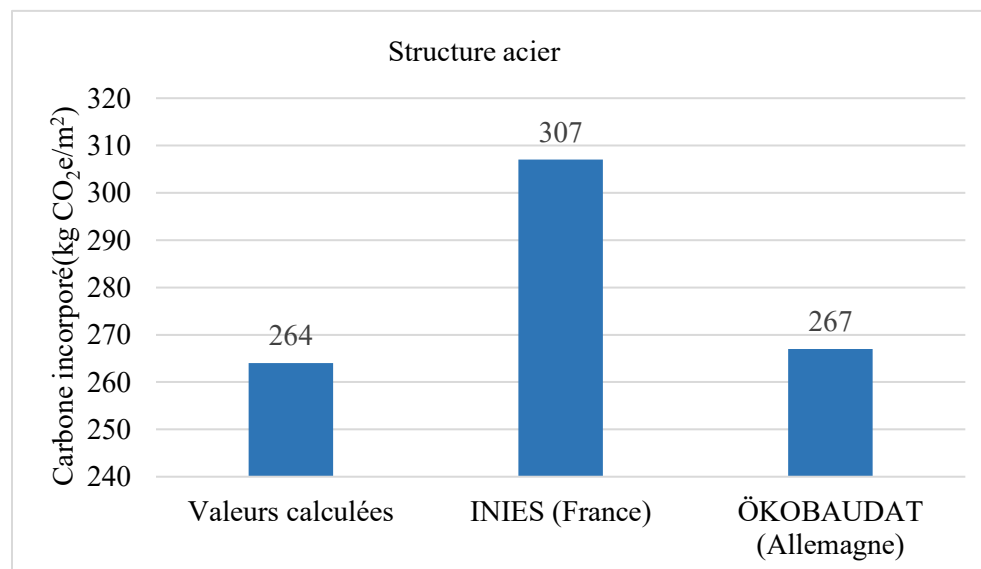
**Tableau 16.** Calcul des valeurs génériques INIES sans pénalisation pour le bardage en acier

| Bardage INES                | PRP A1-A3 / m2 | GWP A1-A3 / kg | Mass  |
|-----------------------------|----------------|----------------|-------|
| FDES 1                      | 18.1           | 2.83           | 6.39  |
| FDES 2                      | 25.52          | 2.85           | 8.96  |
| moyenne                     | 21.81          | 2.84           | 7.675 |
| Ecart-type                  | 5.25           | /              | /     |
| (moyenne+2)*1.3             | 41.99          | 5.47           | 7.675 |
| Valeurs génériques des FDES | 40.6           | 5.29           | 7.675 |

**Tableau 17.** PRP des différents scénarios de l'analyse de sensibilité

| PRP<br>(kgCO <sub>2</sub> e/kg<br>d'acier) | EI<br>Hajoui | INIES<br>(valeur<br>générique) | INIES<br>(sans<br>pénalité) | ÖKOBAUDAT<br>(valeur<br>générique) | ÖKOBAUDAT<br>(sans pénalité) | TOTEM<br>(valeur<br>générique) |
|--------------------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Sections                                   | 1.53         | 3.52                           | 1.82                        | 1.46                               | 1.22                         | 2.19                           |
| Armature                                   | 1.40         | 3.54                           | 0.90                        | 0.64                               | 0.54                         | 1.62                           |
| Produits Plats                             | 1.54         | 5.25                           | 2.84                        | 2.74                               | 2.29                         | 2.90                           |

Les Figures 12 et 13 présentent la variation du carbone incorporé des bâtiments à structure acier en béton respectivement lorsque l'on compare les impacts obtenus en utilisant les valeurs de référence du PRP développées dans cette étude ou en utilisant les valeurs génériques sans pénalisation des bases INIES et ÖKOBAUDAT (voir Tableau 17).

**Figure 12.** Comparaison des résultats INIES et ÖKOBAUDAT sans pénalisation pour le bâtiment à structure en acier

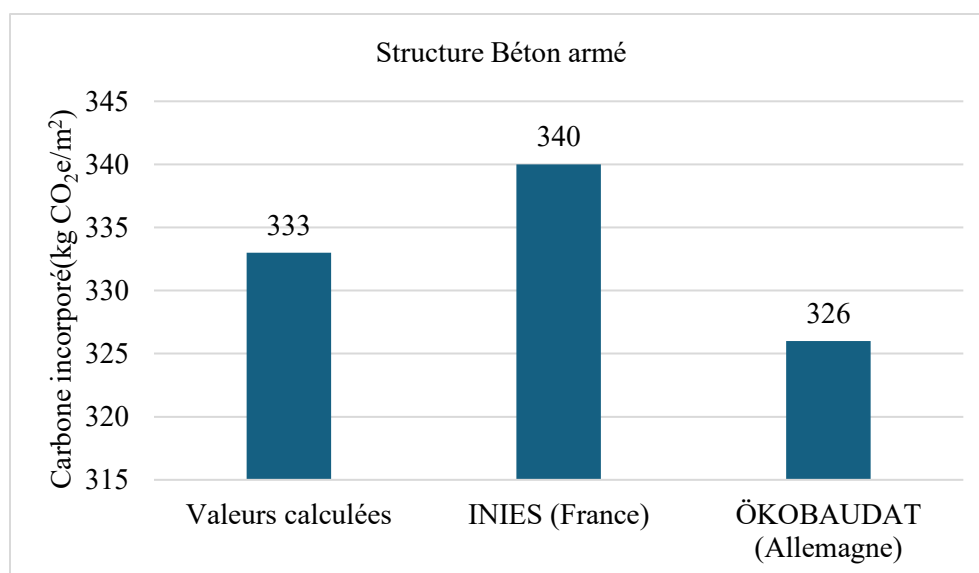


**Figure 13.** Comparaison des résultats INIES et ÖKOBAUDAT sans pénalisation pour le bâtiment à structure en béton armé

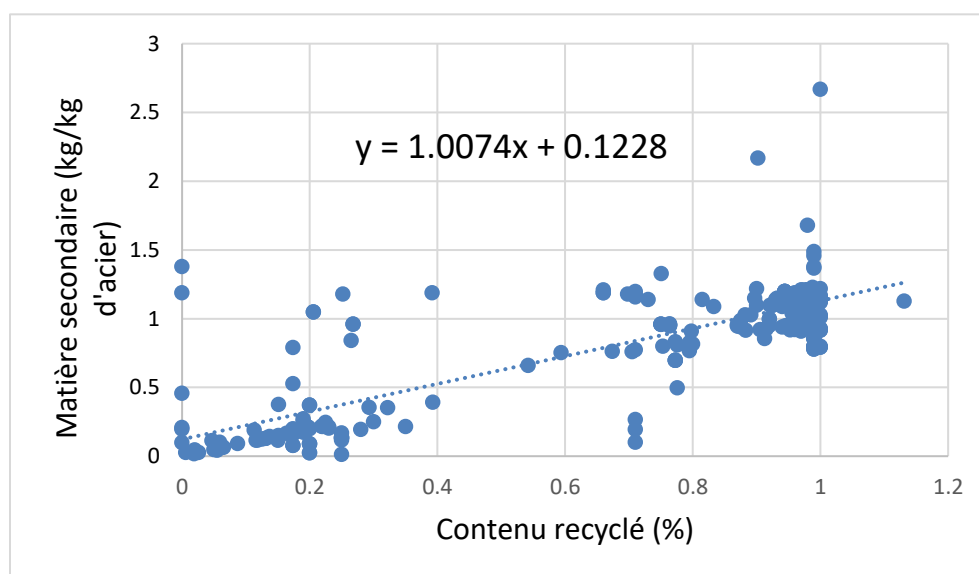


**Figure 14.** Relation linéaire entre la matière secondaire et le contenu recyclé

### **Annexe D: Rapports des entretiens avec les experts du secteur**

#### ***Entretien avec Paul Wurth***

Date : 12 mai 2026

Format : Réunion Teams

Participants : Maryam Baniyadi, Paul Baustert, Ingrid Wokoum Bioum

Objectif de l'entretien

- Recueillir un avis d'expert sur les technologies de production d'acier.
- Discuter des premiers résultats du mémoire.
- Échanger sur les données d'importation de l'acier au Luxembourg.

Principaux enseignements

- Les performances environnementales des filières BOF varient fortement selon les équipements et le contexte de production.
- Les DEP peuvent refléter des différences liées à l'origine géographique des produits et aux conditions de production.
- Les technologies de captage et valorisation du carbone (CCUS) restent encore peu déployées à l'échelle industrielle.

Contribution à l'étude : cet entretien a permis de mieux interpréter la variabilité observée entre les DEP et de consolider les hypothèses liées aux filières de production de l'acier.

#### ***Entretien avec ArcelorMittal***

Date : 28 mai 2026

Format : Réunion Teams

Participants : Liudmila Weber, Paul Baustert, Marie-Alix Dalle, Ingrid Wokoum Bioum

Objectif de l'entretien

- Présenter les premiers résultats du mémoire.
- Discuter de la cohérence des facteurs d'émission obtenus.
- Obtenir des informations sur la production luxembourgeoise d'acier de construction.

Principaux enseignements

- Les indicateurs environnementaux autres que le PRP doivent également être pris en considération.
- Certaines valeurs déclarées dans les DEP, notamment concernant les matières secondaires, nécessitent une analyse critique.
- Les données de production nationale constituent un élément important pour la validation du modèle.

Contribution à l'étude : cet entretien a permis de confronter les résultats aux pratiques industrielles et de renforcer la pertinence des hypothèses retenues.

### ***Entretien avec E3Consult***

Date : 28 mai 2026

Format : Réunion Teams

Participants : Ghizlane El Hajoui, Paul Baustert, Ingrid Wokoum Bioum

Objectif de l'entretien

- Obtenir les données des bâtiments de référence.
- Discuter de l'analyse de sensibilité menée dans le cadre du mémoire.

Principaux enseignements

- Les praticiens luxembourgeois sont confrontés à un manque de données environnementales représentatives du contexte national.
- Le choix des bases de données constitue une difficulté récurrente pour les ACV de bâtiments.
- Les données des bâtiments de référence ont pu être mobilisées pour évaluer l'influence des différentes valeurs de PRP de l'acier.

Contribution à l'étude : cet entretien a confirmé la pertinence du développement de valeurs de référence nationales et a contribué à la réalisation de l'analyse de sensibilité présentée dans ce mémoire.