

PLAN DE TRANSITION SECTORIEL DE L'INDUSTRIE DE L'ACIER EN FRANCE

Etat des lieux de la filière, modélisation
de la décarbonation et pistes d'actions

RAPPORT FINAL

EXPERTISES 

Juillet 2024

REMERCIEMENTS

L'ADEME tient à remercier tout particulièrement les acteurs de la filière acier pour leur participation et leur implication durant toute l'élaboration du Plan de Transition Sectoriel :

Bruno JACQUEMIN, Maxime LAZARD (ALLIANCE DES MINERAIS, MINERAUX ET METAUX)
Nathalie FOURNIER, Damien CHAMBOLLE, Bernard PETETIN, Daniel HAFFNER, Valentine WEBER-ZOLLINGER, Jean-Paul ALLEMAND, Frederic GEFFRAYE (ARCELOR MITTAL)
Virginie CORBIC, Frederic PERRET (UGITECH)
Yves ZBACZYNIAK, Jean ARRIBE, Olivier LEBRUN (ASCOMETAL)
Vincent SMEEKERT, Guillaume MARTIN (BELTRAME GROUP)
Natacha MELQUIOT, Edith MONTOYA (CELSA FRANCE)
Jean-Philippe LETELLIER (ERAMET)
Laurent PIRANDA, Alain MENEC (APERAM)
Romain KEREBEL, Alexandre MARIN (RIVA GROUP)
Gregory BETREMIEUX (ASCOVAL)
Marie-Celeste DEOLIVEIRA, Christophe BERTONCELLI (WINOAGROUP)

L'ADEME tient également à remercier l'ensemble des participants aux différents échanges bilatéraux et ateliers de travail, en particulier :

Gilles LEBOUQUIN (ALUMINIUM FRANCE EXTRUSION) ; Heinrich BAUDOUIN, Bruno MAGNIN, Pierre-Yves MENET, Marc BISSERIE (CONSTELLIUM) ; Jean-Paul AGHETTI (EXELTIUM) ; Bertrand ALLANO, Sylvie FRAYSSE, Jean-Philippe SCHNEIDER (RIO TINTO) ; Chris BATAILLE (IDDRI) ; Oliver SARTOR (Agora Energiewende)

Ainsi que : Alix BOUXIN (ADEME)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. Q. Minier, S. Sourisseau, E. Mari, A. Pillet, 2024. Plan de Transition Sectoriel de l'industrie de l'acier en France : Rapport final. 159 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Référence Projet LIFE Finance ClimAct : LIFE 18/IPC/FR/000010 (Action C7.1. Plans de Transition Sectoriels)

Coordination technique - ADEME : Elliot MARI, Quentin MINIER, Sylvain SOURISSEAU, Adeline PILLET

Direction/Service : Direction Entreprises et Transitions Industrielles/Service Décarbonation de l'Industrie et Hydrogène

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
1. INTRODUCTION ET METHODE	7
1.1. Contexte général et objectifs	7
1.2. Le Plan de Transition Sectoriel : une vision à 360°	7
1.3. La sidérurgie, secteur industriel le plus émetteur et principal consommateur de charbon	9
1.4. Principales limites et portée de l'étude.....	10
1.5. Méthode de construction d'un Plan de Transition Sectoriel.....	11
1.5.1. Phase I : Etat des lieux	11
1.5.2. Phase II : Construction des scénarios de décarbonation.....	12
1.5.2.1. Modélisation de l'outil productif en usine de référence	12
1.5.2.2. Modélisation d'un scénario de référence avec les parties prenantes de la filière	12
1.5.2.3. Elaboration et modélisation de scénario alternatifs de décarbonation	14
1.5.2.4. Analyse socio-économique comparative des scénarios.....	14
1.5.3. Phase III : Proposition de pistes d'actions.....	14
2. CHAINE DE VALEUR DE L'ACIER : CONSTAT ET PERSPECTIVES	15
2.1. Production mondiale et filières.....	15
2.2. Des usages de l'acier centrés sur le BTP, les équipements et la mobilité.....	17
2.3. Une dégradation du solde commercial de la sidérurgie française et des perspectives d'évolution très incertaines	20
2.4. Zoom sur les intrants matière	21
2.4.1. Minerai de fer	21
2.4.2. Métaux d'addition.....	22
2.4.3. Les ferrailles.....	25
2.4.3.1. Enjeux quantitatifs	25
2.4.3.2. Qualité des ferrailles	27
2.5. Co-produits : les laitiers sidérurgiques	27
3. COMMENT FABRIQUER DE L'ACIER ? PASSE, PRESENT, FUTUR.	29
3.1. Histoire des procédés de production d'acier	29
3.2. Filière haut fourneau	31
3.2.1. Procédés de la filière hauts fourneaux	31
3.2.1.1. Agglomération	31
3.2.1.1.1. Agglomération sur grille.....	32
3.2.1.1.2. Agglomération en boulettes	32
3.2.1.2. Cokerie	33
3.2.1.3. Haut fourneau.....	33
3.2.1.4. Aciérie de conversion.....	35
3.2.1.5. Métallurgie secondaire	36
3.2.1.6. Gaz sidérurgiques.....	38
3.2.2. Modélisation de la filière hauts fourneaux	39
3.2.2.1. Modélisation de l'agglomération	42
3.2.2.2. Modélisation de la cokerie.....	43
3.2.2.3. Modélisation du haut fourneau	43
3.2.2.4. Modélisation de l'aciérie de conversion	44
3.2.2.5. Modélisation de la première transformation	45

3.2.2.6. Modélisation du séparateur d'air	45
3.2.3. Technologies de décarbonation des hauts fourneaux	45
3.2.3.1. Augmentation du taux de ferrailles dans le convertisseur	45
3.2.3.2. Modélisation de l'augmentation du taux de ferrailles.....	47
3.2.3.3. Changement d'agents réducteurs.....	47
3.2.3.3.1. Injection de gaz naturel dans les hauts fourneaux	47
Modélisation de l'injection de gaz naturel dans les hauts fourneaux.....	48
3.2.3.3.2. Injection d'hydrogène dans les hauts fourneaux.....	49
Modélisation de l'injection d'hydrogène dans les hauts fourneaux	50
3.2.3.3.3. Injection de gaz de cokerie dans les hauts fourneaux	52
Modélisation de l'injection de gaz de cokerie dans les hauts fourneaux.....	52
3.2.3.3.4. La recirculation des gaz sidérurgiques (TGR-BF).....	52
Modélisation de la recirculation des gaz de haut fourneau.....	54
3.2.3.3.5. Injection de plastiques dans les hauts fourneaux.....	56
Modélisation de l'injection de plastiques dans les hauts fourneaux	57
3.2.3.3.6. Charbon d'origine biosourcée.....	57
Modélisation de l'injection de biocharbon.....	57
3.2.3.4. Captage et stockage géologique du CO ₂	58
3.2.3.4.1. Captage du CO ₂ par TGR-BF	58
Modélisation du captage de CO ₂ par TGR-BF	59
3.3. Filière électrique	60
3.3.1. Procédés de la filière électrique	60
3.3.2. Modélisation de la filière électrique.....	63
3.3.3. Technologies de décarbonation de la filière électrique	66
3.3.3.1. Traitement et nettoyage des ferrailles de moins bonne qualité	66
3.3.3.2. Efficacité énergétique	66
3.3.3.2.1. Digitalisation	66
3.3.3.2.2. Brassage électromagnétique	66
3.3.3.2.3. Préchauffage de la ferraille	66
3.3.3.2.4. Amélioration de l'étanchéité du four électrique	67
3.3.3.2.5. Brûleurs régénératifs	67
3.3.3.2.6. Brûleurs oxy-fuel.....	68
3.3.3.2.7. Four à arc électrique à courant continu.....	68
3.3.3.3. Electrification	69
3.3.3.3.1. Four à induction	69
3.3.3.3.2. Résistances électriques.....	69
3.3.3.3.3. pompes à vide pour VOD	69
3.3.3.3.4. Combustion directe d'hydrogène	70
3.3.3.4. CCUS.....	70
3.3.3.4.1. Captage et stockage du CO ₂	70
3.3.3.4.2. Recarbonatation des laitiers	70
3.3.3.1. Changement d'agent réducteur.....	70
3.3.3.1.1. Utilisation de biomasse.....	70
3.3.3.1.2. Utilisation de déchets organiques	71
3.4. Filière de réduction directe	71
3.4.1. Procédés de filière de réduction directe	71
3.4.1.1. Procédés conventionnels	71
3.4.1.2. Procédé mixte gaz naturel/gaz de synthèse	74
3.4.1.2.1. Captage du CO ₂ sur procédé DRI-EAF	77
3.4.1.3. Vers un procédé 100 % hydrogène	77

3.4.1.4. Voie DRI-Melter-BOF.....	79
3.4.2. Modélisation de la voie DRI-EAF	80
3.5. Nouveaux procédés de fabrication de l'acier	87
3.5.1. Le smelting (HIsarna).....	87
3.5.2. Electrolyse directe du fer	87
3.5.2.1. Electrolyse en milieu alcalin.....	88
3.5.2.2. Electrolyse à sel fondu (MOE)	89
3.5.2.3. Procédé ELECTRA	90
3.6. Première transformation	90
3.6.1. Procédés de première transformation.....	90
3.6.1.1. Coulée continue et train de laminage.....	90
3.6.2. Modélisation de la première transformation.....	91
3.6.3. Technologies de décarbonation de la première transformation	91
3.6.3.1. Brûleurs régénératifs	91
3.6.3.2. Brûleurs oxy-fuel	91
3.6.3.3. L'enfournement à chaud.....	91
3.6.3.4. L'électrification totale ou partielle des procédés de laminage.....	92
3.6.3.5. Combustion directe d'hydrogène	92
3.6.3.6. Captage du CO ₂ sur le laminage	92
3.7. Bilan des technologies de décarbonation.....	93
3.7.1. Revue de littérature des coûts d'investissement dans la filière primaire	93
3.7.2. Bilan des données technico-économiques de la filière électrique.....	95
3.8. Coût de production de l'acier.....	98
4. TROIS SCENARIOS CONTRASTES POUR ILLUSTRER LES DEFIS D'UNE DECARBONATION PROFONDE DE LA SIDERURGIE D'ICI 2050	102
4.1. Univers de transition	102
4.2. Principales hypothèses de marché	104
4.2.1. Demande domestique	104
4.2.2. Commerce international.....	106
4.3. Scénario « Pari Hydrogéné » : une production en hausse assurée par l'usage d'hydrogène électrolytique à un prix compétitif	107
4.3.1. Une production en hausse du fait d'un effort de relocalisation et d'une demande stable	107
4.3.2. Une transition technologique ambitieuse vers la réduction directe par hydrogène pour remplacer les hauts fourneaux.....	108
4.4. Scénario « Compétitivité dégradée » : face au manque de compétitivité des prix de l'énergie en France, la décarbonation de l'acier repose sur la délocalisation de la production et le captage de CO₂, plutôt qu'un recours trop coûteux à l'hydrogène	110
4.4.1. Un net recul de la production du fait de délocalisations et malgré une consommation intensifiée	110
4.4.2. Une transition technologique des hauts fourneaux vers les fours à arc électrique, intégrant une production de nationale de DRI limitée et basée sur l'utilisation de gaz naturel et la séquestration de CO₂.....	111

4.5. Scénario « Sobriété et diversification » : de multiples voies technologiques accompagnées d'un effort de sobriété.....	113
4.5.1. Une baisse de la production en lien avec la sobriété immobilière, malgré un net effort de relocalisation de certaines activités	113
4.5.2. Une décarbonation technologique diversifiée entre le maintien d'un haut fourneau, la réduction directe par hydrogène et l'électrolyse du fer	114
5. ANALYSES COMPAREES SUR LES PERSPECTIVES DE DECARBONATION DE LA FILIERE SIDERURGIQUE	117
5.1. Production	117
5.2. Emissions cumulées	117
5.3. Investissements	118
5.4. Energie.....	119
5.5. Ferrailles	120
5.6. Chaines de valeur.....	121
5.7. Coût de production	124
5.8. La réduction directe par hydrogène : une technologie privilégiée qui reste particulièrement coûteuse dans les conditions actuelles de prix	126
5.8.1. Une voie DRP-H₂ coûteuse sauf à renchérir le prix du CO₂ et baisser ceux de l'électricité et de l'hydrogène, contre une voie DRP-GN-CCS déjà rentable.....	127
5.8.2. Décarboner les hauts fourneaux : un gain rapide en attendant le déploiement de la réduction directe et de l'électrolyse du fer ?	129
5.9. Premières réflexions sur le besoin en emplois directs à horizon 2050.....	131
6. PISTES D'ACTION	132
6.1. Rendre l'outil productif décarboné compétitif.....	133
6.1.1. Soutiens financiers pour maintenir une industrie compétitive	133
6.1.2. Développement d'installations de production d'hydrogène bas carbone.....	135
6.1.3. Garantir l'approvisionnement en électricité	136
6.2. Amélioration du recyclage	137
6.2.1. Collecte et tri des déchets d'acier	137
6.2.2. Limiter l'export de déchets d'acier	139
6.2.3. Soutien à l'innovation - procédés de recyclage	140
6.3. Anticiper les niveaux de demande de demain.....	141
6.3.1. Relocalisation de la chaîne de valeur aval de l'acier.....	141
6.3.2. Favoriser l'intégration d'acier dit « bas carbone » dans les produits finaux	142
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	144
ANNEXES	151
Annexe n°1 – Hypothèses de taux de carbone et de facteurs d'émission	151
Annexe n°2 – Hypothèses sur les prix.....	151
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	153
SIGLES ET ACRONYMES	157

1. Introduction et méthode

1.1. Contexte général et objectifs

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) définit la trajectoire qu'entend prendre la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050¹, engagement qu'elle a pris à la suite de la 21ème conférence des parties (COP 21) de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Pour l'industrie, cette trajectoire se traduit par une diminution de 81 % des émissions en 2050 par rapport à 2015. Un objectif intermédiaire de -35% des émissions est également prévu à l'horizon 2030. Même si quelques orientations sont mises en avant (ex. : donner un cadre incitant à la maîtrise de la demande en énergie et en matières, privilégier les énergies décarbonées et l'économie circulaire, etc.), leurs contenus et leurs coûts sur le plan opérationnel ne sont pas détaillés, engendrant un manque de visibilité problématique pour les industriels dont l'engagement pour réaliser des investissements nécessite une projection à moyen terme. En effet, il n'est pas rare, en particulier dans l'industrie lourde, qu'un outil industriel ait une durée de vie de plusieurs dizaines d'années : il est donc probable que les équipements qui fonctionneront dans 30 ans seront des équipements dont la décision d'investissement sera prise dans les mois à venir. C'est dans ce cadre temporel et ce besoin de visibilité pour les industriels que s'inscrivent les Plans de Transition Sectoriels. Pour les pouvoirs publics, il s'agit également de pouvoir proposer des politiques efficaces qui favorisent la prise de décisions quant aux investissements nécessaires pour atteindre un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050.

En construisant ces Plans de Transition Sectoriels (PTS) en concertation avec les acteurs-clés des filières concernées, l'ADEME souhaite offrir de la visibilité à la fois aux industriels et aux investisseurs mais aussi aux pouvoirs publics pour atteindre l'objectif de -81 % fixé dans la SNBC pour l'industrie. Le projet s'inscrit donc dans la continuité des travaux effectués pour la SNBC en désagrégant l'industrie lourde en 9 secteurs afin d'adapter les solutions de décarbonation au plus près des problématiques industrielles de chaque secteur (Figure 1).



Figure 1: Les 9 secteurs couverts par les Plans de Transition Sectoriels

Les PTS se concentrent sur le périmètre français malgré le fait que les leaders industriels nationaux aient une activité qui dépasse largement les frontières nationales. Des ouvertures internationales sont néanmoins envisagées au travers de partages de bonnes pratiques méthodologiques et de soutien à des outils internationaux existants, en particulier l'initiative ACT® (Assessing low Carbon Transition)²

1.2. Le Plan de Transition Sectoriel : une vision à 360°

Partant du constat que la grande majorité des travaux issus de la littérature nationale, européenne ou internationale abordent essentiellement la composante technologique de la transition industrielle, le projet adopte une vision à 360° afin de ne pas négliger les aspects tel que le coût ou les impacts de cette transition sur le marché et l'emploi. Intégrés dans un programme européen LIFE intitulé Finance ClimAct³ (Figure 2), les PTS s'appuient sur une analyse croisée du déploiement des technologies de décarbonation, du coût que cela représente notamment pour anticiper les besoins de financement et les effets sur la compétitivité, et de l'impact de l'évolution du marché en matière de demande et de concurrence à horizon 2050.

¹ L'actuelle révision de la SNBC (3^e édition) conduira potentiellement à la définition de nouveaux objectifs sectoriels. Pour plus d'informations : <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-francaise-lennergie-et-climat-lancement-consultation-publique>

² Plus d'informations sont disponibles sur le site de l'initiative ACT : <https://actinitiative.org/>

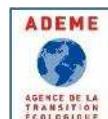
³ Le programme LIFE est l'instrument européen de financement pour l'environnement et l'action pour le climat en place depuis 1992. Plus d'informations sont disponibles sur le site Finance ClimAct : <https://finance-climact.fr>



30
personnes
à temps plein
sur le projet

18
millions d'euros
de budget

5
ans



Partenaires du projet

ACPR, AMF, Banque de France, Institute for Climate Economics, Ministère de la Transition écologique, 2° Investing Initiative, Institut de la finance durable, RMI (Rocky Mountain Institute)

Figure 2: Projet Finance ClimAct

Les effets sur l'emploi et les éventuelles évolutions de compétences engendrées (reconversion, relocalisation ...) pour s'adapter à la transition du secteur sont également discutés dans le cadre des PTS, de même que le sujet de l'ancrage territorial et du degré de dépendance d'un territoire vis-à-vis du secteur industriel étudié. Des propositions de politiques publiques (ex. : mesures de soutien, fiscalité, réglementations) mais aussi des engagements potentiels des parties prenantes de chaque filière (industriels, financeurs, clients, fournisseurs ...) seront adossés aux différents scénarios. *In fine*, ce travail doit aboutir à la formulation de pistes d'actions « publiques-privées » pour appuyer le secteur dans la réalisation de sa transition.

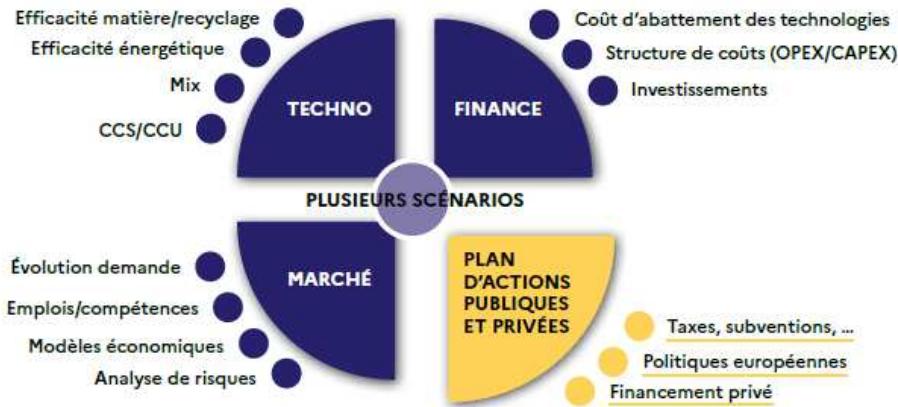


Figure 3: Visions à 360° du plan de transition

1.3. La sidérurgie, secteur industriel le plus émetteur et principal consommateur de charbon

Au niveau mondial, les émissions directes de CO₂ liées à la production d'acier (2,6 GtCO₂/an) représentent environ 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre⁴ (GES) surtout du fait d'une importante consommation de charbon, qui représente 74 % des besoins en énergie. En plus de ces émissions directes, la valorisation énergétique des gaz sidérurgiques issus des procédés (ex. : gaz de cokerie, gaz de haut fourneau) ainsi que la consommation d'autres sources d'énergie (vapeur, électricité) ajoutent 1,1 GtCO₂/an d'émissions annuelles indirectes. Au total, la production d'acier est donc **responsable de 3,7 GtCO₂/an soit environ 7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et 10 % des émissions de CO₂ du système énergétique** [1].

En France, en comptant les émissions liées à la valorisation énergétique des gaz sidérurgiques, la production d'acier représente environ entre 20 et 25 MtCO₂ d'émissions directes (Figure 4) selon les années entre 2010 et 2017, soit 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) annuelles françaises⁵ et le quart des émissions de l'industrie française.

⁴ En 2019, en incluant le secteur UTCATF (utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie).

⁵ En 2019, hors UTCATF.

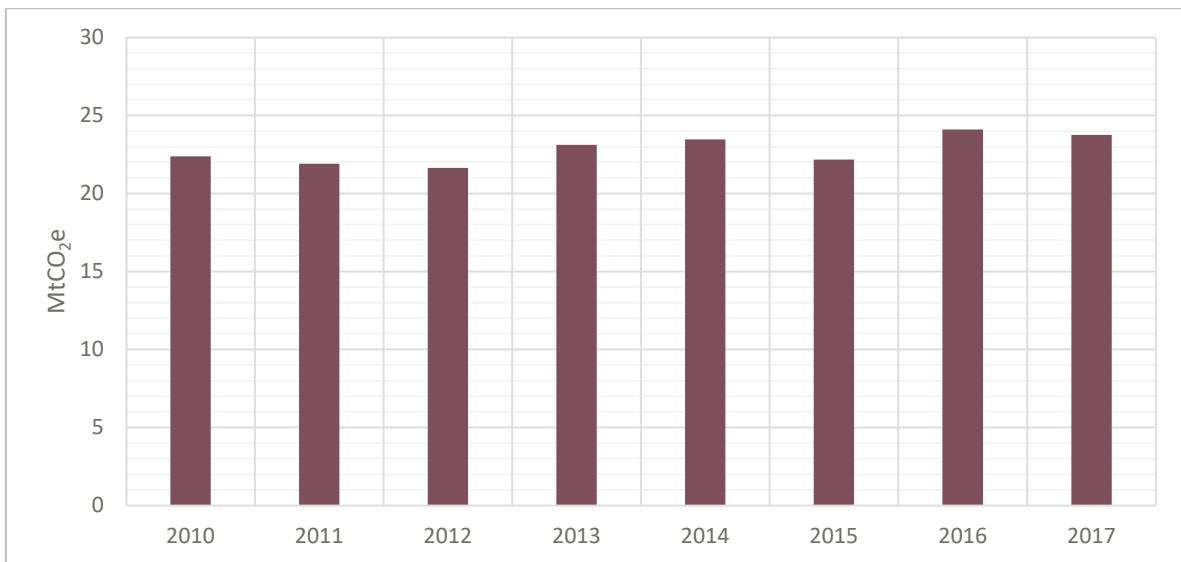


Figure 4: Émissions annuelles de GES de la sidérurgie en France [2]

Parmi tous les secteurs concernés par un Plan de Transition Sectoriel, le secteur de l'acier est celui qui, de loin, concentre le plus d'émissions de GES (Figure 5).

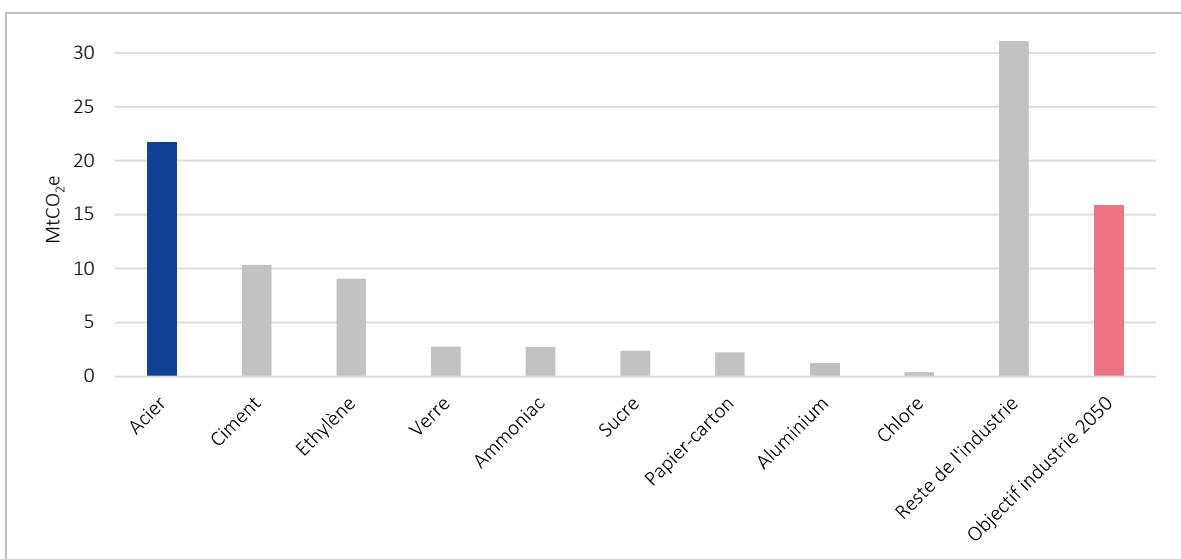


Figure 5: Emissions directes de GES de l'industrie en 2015 selon les principaux secteurs énergo-intensifs (source : calculs ADEME sur la base des données du Citepa)

1.4. Principales limites et portée de l'étude

L'ensemble des résultats présentés sont issus d'un exercice ambitieux de modélisation de trajectoires de décarbonation de l'industrie de l'acier à horizon 2050 avec une méthodologie innovante mais aussi soumise à des limites notamment de périmètre ou d'accès à la donnée. C'est avec ce prisme que le lecteur doit appréhender ce document quant aux conclusions qu'il pourra en tirer, notamment en considérant les éléments suivants :

- **Un objectif commun de réduction des émissions pour des secteurs industriels différents.** L'objectif, issu de la SNBC 2, de réduire de 81 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'industrie manufacturière a été décliné pour le sous-secteur de l'industrie de l'acier comme une contrainte d'entrée à l'exercice de scénarisation. Ce choix présente l'avantage de définir un cadre de travail commun à tous les secteurs couverts par un Plan de Transition Sectoriel. Toutefois, cette hypothèse ferme la porte à une allocation plus flexible des objectifs de réduction des émissions entre des secteurs industriels pour lesquels les potentiels d'abattement et les efforts de décarbonation associés peuvent être différents. L'étude de tous les secteurs pourrait permettre, à terme, de définir des objectifs plus adaptés.

- **Un exercice centré sur les émissions directes.** Conformément à cet objectif issu de la SNBC 2, seules les émissions directes des sites sidérurgiques français sont incluses dans le périmètre (émissions de catégorie 1). Les émissions liées à la production externe d'énergie (électricité notamment), à l'aval (ex. : transport de l'acier) ou à l'amont (ex. : production de ferroalliages) des sites sidérurgiques ne sont pas couvertes. Ainsi, par exemple, les émissions liées à la consommation électrique des installations de réduction directe par hydrogène ou d'électrolyse du fer ne sont pas considérées, de même que les émissions externalisées à l'étranger du fait de modifications de la chaîne de valeur.
- **Une vision élargie du secteur de l'acier qui dépend fortement de facteurs exogènes.** Cet exercice vise à donner une vision la plus large possible des déterminants des émissions de GES de l'industrie sidérurgique. Il a donc été nécessaire de faire, directement ou indirectement, des hypothèses sur des paramètres externes au secteur, tels que la démographie ou encore l'évolution de la demande d'acier en provenance des secteurs du transport et du bâtiment.
- **Et pour autant, une approche qui pourra encore s'enrichir d'autres déterminants portés par d'autres acteurs économiques.** L'industrie de l'acier constitue un maillon d'une économie complexe qui interagit avec des entités en amont et en aval, elles-mêmes en évolution. Une approche systémique exhaustive de la décarbonation du secteur nécessiterait donc d'adopter une vision allant largement au-delà du périmètre de ce secteur et impliquerait une multiplication des hypothèses sur les autres maillons du système. C'est notamment l'ambition du projet de prospective plus global de l'ADEME intitulé Transition(s) 2050⁶ qui a été publié fin 2021.
- **En outre, comme dans tout exercice de prospective, le panel d'hypothèses et de combinaisons de celles-ci est infini et chaque scénario pourra être remis en question par les différents acteurs concernés.** Ainsi, sans leur donner un caractère prédictif, ces scénarios sont essentiellement le fruit d'un travail propre à l'ADEME qui a été soumis pour commentaires aux acteurs de la filière. Pour autant, ils reflètent des univers techniquement plausibles, plus ou moins désirables. Ce travail vise à aider les acteurs à s'emparer de l'exercice, avec la même exigence de transparence sur les hypothèses prises et les univers envisagés, tout en reconnaissant les limites de l'exercice. Ces éléments d'analyse s'appuient sur de nombreuses recherches bibliographiques, des sources d'information publiques ainsi que des entretiens avec les acteurs de la filière, et se veulent le plus objectifs possible compte tenu du croisement de l'ensemble de ces sources par les auteurs.

1.5. Méthode de construction d'un Plan de Transition Sectoriel

Pour étendre les possibilités de réalisation d'un Plan de Transition Sectoriel à d'autres secteurs que les neufs plus grands consommateurs d'énergie, un guide méthodologique a été publié en janvier 2024. Il est accessible sur le site de l'ADEME⁷ et comporte les trois phases décrites ci-après.

1.5.1. Phase I : Etat des lieux

Cette première phase est dédiée à la compréhension des enjeux de décarbonation du secteur. Elle couvre différents aspects liés à la transition énergétique de la filière :

- Ses émissions de gaz à effet de serre (GES) : émetteurs, volumes, nature, historique ;
- Sa chaîne de valeur : acteurs, environnement socio-économique, territorial et réglementaire ;
- Son marché : production, commerce extérieur, secteurs consommateurs ;
- Ses procédés industriels : fonctionnement, intrants énergie-matière, produits et déchets ;
- Ses leviers de décarbonation : maturité, contraintes technico-économiques.

La bibliographie peut être constituée à partir de différents rapports, études, publications scientifiques et base de données. Elle est consolidée et précisée par des entretiens avec les parties prenantes de la filière, en particulier les fédérations et syndicats représentants des industriels, de leurs clients, fournisseurs et des associations de consommateurs.

Cette phase s'ouvre par une réunion avec toutes les parties prenantes de la filière appelée « Kick-off ». Elle a pour objectif de communiquer la démarche à l'ensemble de la filière et d'impliquer les acteurs qui voudraient s'associer au projet. La phase I se clôture par une réunion avec toutes les parties prenantes appelée « Photofilière ». Cette dernière a pour objectif de restituer à la filière l'ensemble de l'analyse bibliographique. Elle permet aussi de fixer le périmètre d'étude du PTS, c'est-à-dire l'ensemble des aspects qui seront couverts ou non par le PTS.

⁶ Pour plus d'informations, consulter le site internet dédié : <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>

⁷ Disponible sur le site de la librairie ADEME : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6780-guide-methodologique-pour-la-redaction-d-un-plan-de-transition-sectoriel-pour-la-decarbonation-de-l-industrie.html>

1.5.2. Phase II : Construction des scénarios de décarbonation

Cette deuxième phase est dédiée à la construction de scénarios de décarbonation de la filière. Elle peut se diviser en 4 sous-phases aux temporalités plus ou moins concomitantes.

1.5.2.1. Modélisation de l'outil productif en usine de référence

Cette première sous-phase consiste en la modélisation du fonctionnement du parc industriel. « Les usines de référence sont des outils de modélisation du parc industriel. Elles représentent les procédés de fabrication les plus couramment employés ou qui seraient amenés à se développer à l'avenir sur le périmètre du parc industriel considéré. Chacune est décrite par sa production, ses équipements, ses procédés, ses consommations d'énergie thermique et électrique, ses émissions de GES et ses coûts de production » (Figure 6). L'usine de référence est un modèle fictif de fonctionnement des procédés industriels mais représentatif du périmètre défini en phase I. Autrement dit, l'usine de référence ne représente pas le fonctionnement d'un site de production ni même la moyenne de ces sites mais le fonctionnement typique et réaliste des procédés industriels couverts par le PTS.

La construction des usines de référence s'appuie sur l'analyse bibliographique des procédés industriels en France et de la collecte de données associées menée en phase I. Plusieurs indicateurs sont alors définis afin de caractériser le fonctionnement de cette usine de référence : consommation de matière et d'énergie spécifique, émissions de GES spécifique, cout de production annuel, etc.

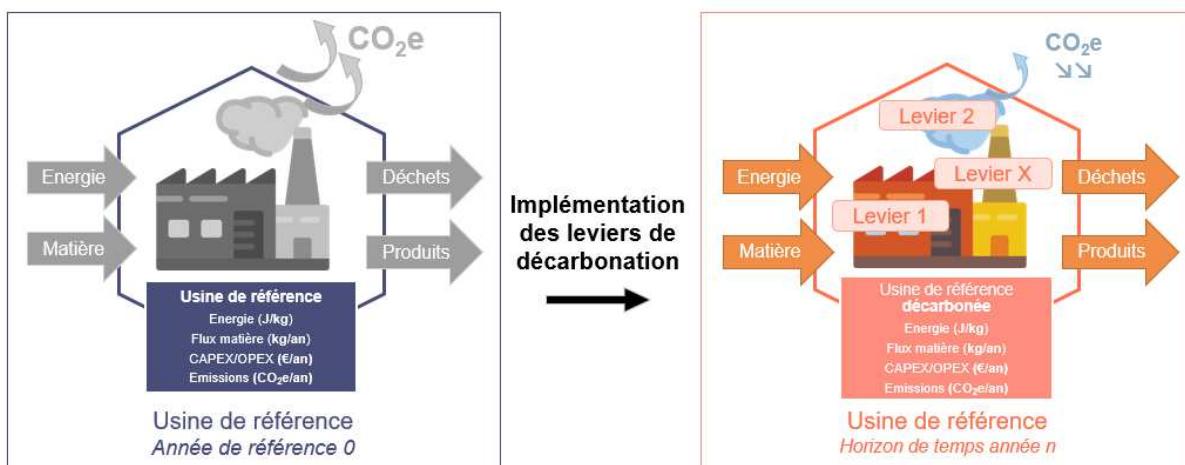


Figure 6: (à gauche) Schéma simplifié d'une usine de référence représentative du fonctionnement des procédés de fabrication en France ; (à droite) Schéma simplifié de la modification du fonctionnement de l'usine de référence après implémentation de leviers de décarbonation

En cas de procédés industriels trop différents il convient alors d'augmenter le nombre d'usines de référence modélisées pour une meilleure description du fonctionnement des procédés industriels ; en cas de manque de données disponibles ou de limite imposée par le secret statistique, il convient de diminuer le nombre d'usines de référence modélisée afin de représenter des procédés industriels plus généraux.

La ou les usines de référence sont *in fine* soumises à validation aux acteurs industriels concernés. Ces usines de référence sont les briques de base de la modélisation des itinéraires technologiques. L'implémentation des solutions de décarbonation viendront en effet modifier son fonctionnement : le suivi de l'évolution de ses indicateurs clés permettront ainsi de mesurer les impacts de ces différents leviers de décarbonation.

1.5.2.2. Modélisation d'un scénario de référence avec les parties prenantes de la filière

Cette deuxième sous-phase consiste en la construction d'un scénario de décarbonation tendanciel de la filière. La modélisation d'un scénario consiste à définir un univers de transition ainsi que des hypothèses d'évolutions des technologiques, de marché et transverses (Encadré 1).

L'univers de transition et les hypothèses d'évolution associées sont ainsi choisis dans une certaine continuité des dynamiques historiques. Ce scénario permet d'illustrer la transition de la filière sans hypothèses fortes sur les évolutions de marché de la filière. Ainsi, l'itinéraire technologique se base sur des technologies identifiées comme plausibles pour les acteurs de la filière ; l'itinéraire marché se base sur la prolongation des niveaux de consommation actuels ainsi que des dynamiques de commerce extérieure stable. Ces propositions sont discutées avec les parties prenantes de la filière lors d'entretiens bilatéraux. Elles

sont comparées aux feuilles de route préexistantes et aux stratégies de décarbonation industrielles. Durant cette période, les hypothèses sont révisées de façon à s'accorder sur des itinéraires en concertation avec les parties prenantes de la filière.

Encadré 1 : Lexique de la prospective dans les PTS

Scénario : ensemble cohérent d'un choix d'univers de transition dans lequel sont décidées des hypothèses d'évolution technologique, des hypothèses d'évolution de marché et des hypothèses d'évolutions transversales, qui résultent en des trajectoires technico-financières, économiques et sociales de décarbonation de la filière étudiée. A la différence d'une feuille de route, les scénarios permettent d'explorer des configurations possibles d'un avenir incertain.

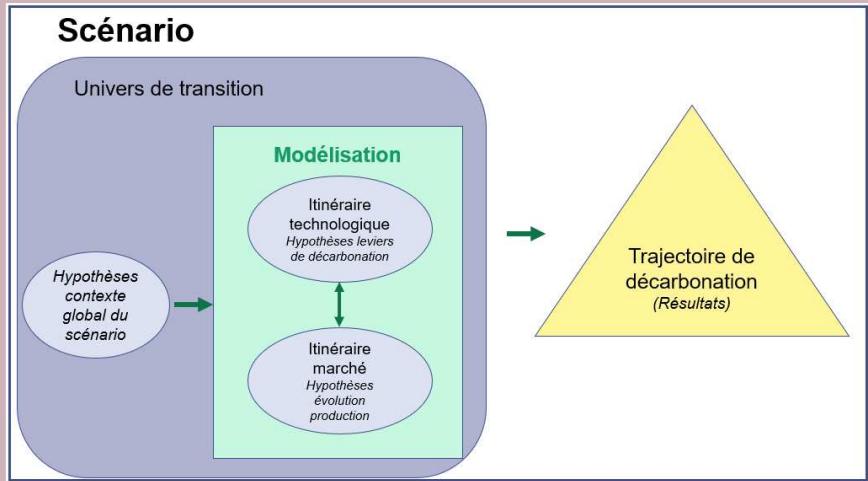


Figure 7: Structure d'un scénario dans les PTS de l'ADEME

Univers de transition : « contexte exogène dans lequel la transition du secteur pourrait s'opérer d'ici 2050. Sa description s'appuie sur des éléments quantitatifs mais aussi qualitatifs qui pourraient avoir un impact [...] sur les stratégies de décarbonation retenues. ». Plusieurs univers de transition peuvent être imaginés pour autant de scénario. Leur construction s'appuie sur des hypothèses d'évolution de facteurs d'incertitudes structurants.

Facteur d'incertitude structurant : élément de récit qualitatif associé à un fort niveau d'incertitude et un fort potentiel d'impact sur les émissions d'une filière. Ces facteurs d'incertitude structurants peuvent être « globaux » (prix et disponibilité de la matière, évolution de contexte géopolitique, etc.), de « marché » (habitudes de consommation, politiques publiques et réglementations, etc.) ou « technologiques » (développement de technologie de rupture et d'infrastructures, conditions de mise en œuvre opérationnelle de solutions de décarbonation, etc.).

Modélisation : ensemble de l'interface numérique permettant (1) de représenter le fonctionnement énergie-matière-émissions-couts du parc industriel au temps $t = 0$, (2) de transformer l'ensemble des hypothèses technologiques en itinéraire technologique et (3) l'ensemble des hypothèses marché en itinéraire marché, dans un univers de transition donné.

Itinéraire technologique : résultante des hypothèses d'évolution technologiques, dans un univers de qui « définit [le] déploiement [temporel, au pas de temps annuel] des leviers de décarbonation sur le parc industriel. ».

Itinéraire marché : résultante des hypothèses d'évolution de marché (niveaux de consommation, évolution du commerce extérieur), qui « permet d'aboutir aux volumes de production [annuels] » de la filière.

Trajectoire de décarbonation : combinaison de l'itinéraire technologique et de l'itinéraire marché. Elle se matérialise par exemple par l'évolution des émissions de GES d'une filière mais comprend aussi d'autres résultats comme l'évolution de la consommation d'énergie, les chroniques d'investissements technologiques, l'évolution des couts de production, l'impact sur l'emploi...

Scénario alternatif : scénario au changement de paradigme important, dans lequel l'univers de transition et les hypothèses d'évolution associées sont très contrastés afin d'illustrer l'impact de facteurs d'incertitudes structurants sur la transition de la filière. S'oppose au scénario de référence, à l'univers de transition et aux hypothèses d'évolution tendanciels.

1.5.2.3. *Elaboration et modélisation de scénario alternatifs de décarbonation*

Cette troisième sous-phase est dédiée à l'exploration d'autres scénarios plus contrastés que celui développé précédemment en concertation avec la filière. Ces scénarios alternatifs ont pour but d'illustrer des futurs plausibles basés sur d'autres visions de l'avenir. Ils sont surtout un moyen de mettre en lumière des enjeux souvent peu explorés dans des feuilles de routes plus conventionnelles.

Pour cela, le choix des univers de transition repose sur l'identification de facteurs d'incertitudes structurants (Encadré 1) pour la filière, c'est-à-dire des hypothèses déterminantes pour la transition de cette industrie comme l'évolution de la concurrence internationale, l'accès à une ressource, le développement d'une nouvelle filière ou encore l'avènement d'une technologie de rupture. Le choix de ces univers de transition consiste à fixer ces hypothèses directrices de façon à créer une toile de fond crédible pour la transition de la filière. Afin de couvrir un large spectre de transition pertinent, il peut être intéressant de définir des univers de transition contrastés, aux paradigmes bien différents mais à la désirabilité équilibrée.

Ensuite, les hypothèses d'évolution de marché et d'implémentation de solutions technologiques sont choisies de façon à bâtir des itinéraires marché et technologiques cohérents avec ces univers de transitions alternatifs. De la fixation préalable des hypothèses directrices doit en effet découler certaines hypothèses de transition de la filière. Ainsi, ces scénarios alternatifs sont souvent plus contraints mais peuvent aussi faire apparaître des opportunités de transition différentes pour la filière.

Au sein des Plans de Transition Sectoriels du Ciment et de l'Ammoniac, un scénario de référence et 2 scénarios alternatifs ont pu être réalisés. Concernant tous les autres Plans de Transition Sectoriels étudiés (Aluminium, Acier, Sucre, Verre, Papier-Carton, Chlore et Ethylène), ce sont directement 2 ou 3 scénarios alternatifs qui ont été construits.

1.5.2.4. *Analyse socio-économique comparative des scénarios*

Cette dernière étape permet de pousser l'analyse socio-économiques des différents scénarios. D'abord, elle permet une analyse sur l'évolution des couts de production. Ces résultats peuvent être adossés à une analyse de sensibilité afin de prendre en compte l'incertitude de l'évolution des prix des énergies, matières premières, infrastructures et technologies nécessaires à la transition. Cette évolution des couts de production peut aussi être comparée au cout de production actuel et au cout de production dans un scénario « sans action » puis donner des premiers éléments d'analyse concernant la compétitivité de l'industrie dans chaque scénario. De plus, cette analyse peut être complétée par une analyse sur le report de ce surcout de transition sur la chaîne de valeur et ce jusqu'au consommateur final.

Les couts d'abattement, en €/tCO₂ évitées, peuvent aussi être calculés afin de déterminer quelles sont les technologies et les scénarios de transition les plus compétitifs. Ces résultats pourront être nuancés par d'autres indicateurs ou éléments qualitatifs non pris en compte comme la résilience d'une filière ou encore la souveraineté et la sécurité industrielle qu'elle apporte. Une analyse de sensibilité aux évolutions des CAPEX et des OPEX déterminants pour la filière peuvent aussi permettre d'élargir les résultats et d'y inclure une dimension probabiliste.

Enfin, une analyse sur l'évolution de l'emploi et des territoires est nécessaire afin de rendre compte des potentielles transformations sociales et sociétales engendrées par la transition écologique de l'industrie et de sa chaîne de valeur. Plus spécifiquement, l'évolution des emplois directs de chaque scénario doit être calculé en fonction des niveaux de production et des technologies de décarbonation retenues. Une évolution des emplois indirects sur la chaîne de valeur amont et aval doit venir préciser les besoins des bassins d'emplois en termes de ressources humaines et de formations.

1.5.3. Phase III : Proposition de pistes d'actions

La troisième et dernière phase du PTS est dédié à la proposition de pistes d'actions en faveur de l'accélération de la transition sectorielle et de l'atteinte des objectifs de la SNBC. Ces propositions résultent de la synthèse des enseignements tirés des phases I et II sur l'état des lieux du secteur, ses enjeux de décarbonation et la scénarisation de sa transition bas-carbone. Elles peuvent prendre la forme de recommandations concernant des mesures à prendre à court et moyen-terme ou de valorisations de bonnes pratiques, à la fois par les industriels, les financiers et les pouvoirs publics. Ces pistes sont valorisées au travers de « fiches actions » thématiques, dont le processus de rédaction même est pensé comme un outil de dialogue entre toutes les parties prenantes.

2. Chaîne de valeur de l'acier : constat et perspectives

2.1. Production mondiale et filières

Comme pour beaucoup de matériaux, la production mondiale d'acier est dominée par la Chine, dont les besoins ont continuellement augmenté depuis les années 2000, en particulier pour la construction d'infrastructures et afin de faire face à une urbanisation croissante. Entre 2010 et 2019, la production chinoise a augmenté de 56 % et celle de l'Inde de 63 % quand la production des pays industrialisés européens et mondiaux, s'est stabilisée ou a chuté (ex. : -9% pour l'Allemagne et pour le Japon ; -6% pour la France).

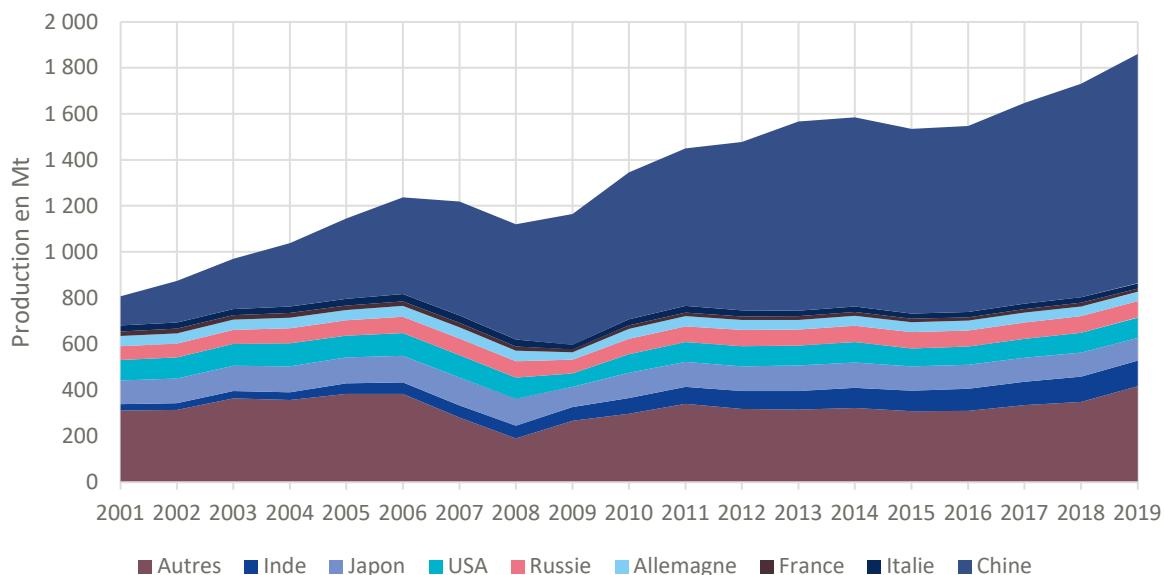


Figure 8 : Panorama mondial de la production d'acier (Source : World Steel Association)

Dans ce contexte, la part de la France dans la production mondiale s'est progressivement réduite en passant de 2,4 % en 2001 à 0,8 % en 2019. Ce constat s'observe également pour l'Allemagne dont la part est passée de 5,5 % à 2,1 % sur cette même période. Au sein de l'Union européenne, l'Allemagne demeure le principal pays producteur avec 40 Mt d'acier produit en 2019, soit 27 % de la production de l'Union européenne, contre moins de 10 % pour la France.

A horizon 2050, les projections de l'Agence Internationale de l'Energie indiquent une progression de la demande d'acier dans le monde, en particulier en Inde et dans d'autres pays émergents [1]. La transformation de l'économie chinoise vers une consommation davantage orientée sur les biens et services que sur les infrastructures devrait conduire à un ralentissement de la hausse de la demande en matériaux de base, et donc à une réduction de la part de la Chine dans la production mondiale d'acier. Selon les scénarios de l'AIE, les pays industrialisés (Union européenne, Etats-Unis, Japon, Corée du sud) devraient maintenir une production relativement constante par rapport aux niveaux actuels. Ces estimations mettent également en lumière l'effet potentiel de l'efficacité matière dans la demande finale d'acier. Cette propension à déployer des politiques d'efficacité matières semble en revanche relativement hétérogène entre les régions et entre les pays.

Au-delà des estimations d'évolutions de la production, il semble également important de tenir compte des structures de production divergentes entre les pays. D'une manière générale, une distinction s'opère entre la filière hauts fourneaux (HF ou « filière fonte ») fournissant de l'acier majoritairement produit à partir de minerai de fer vierge, et la filière électrique dont la production d'acier se réalise par la conversion de ferrailles dans un four à arc électrique (EAF – Electric Arc Furnace)⁸. La répartition de ces deux filières est très variable selon les pays. A titre d'exemple, selon les données de World Steel Association, en 2022 plus de 90 % de l'acier chinois provient de la filière HF contre 73 % au Japon, 57 % en Union Européenne et 31 % aux Etats Unis. Ces structures de production conditionnent à la fois les consommations énergétiques et émissions de GES actuelles de la sidérurgie dans les pays, mais aussi les perspectives d'évolution des appareils productifs dans le futur, en vue de leur décarbonation. En France, la sidérurgie produit annuellement environ 15 Mt d'acier. La filière HF représente 67 % de la production mais 96% des émissions de GES du secteur et la filière électrique, 33 % de la production et 4% des émissions de GES du secteur (Figure 9).

⁸ Plus d'informations sur les procédés en partie 3

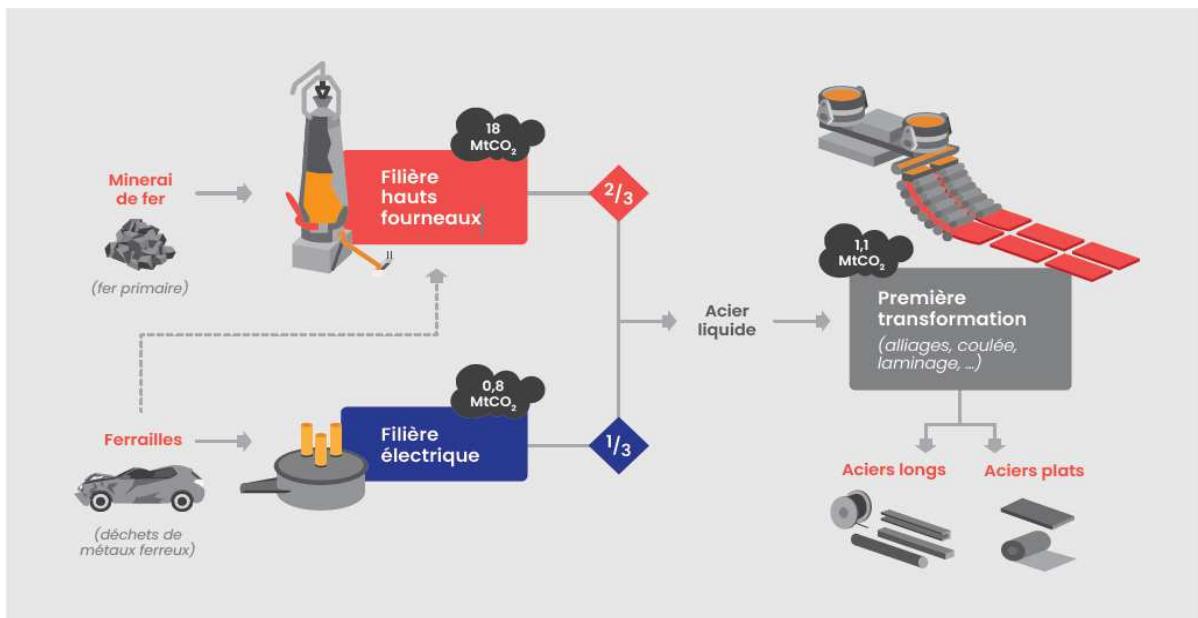


Figure 9: Schéma simplifié des deux voies de production d'acier et de leurs émissions en France.

De ce fait, les émissions sont concentrées en France sur six hauts fourneaux répartis sur trois sites : trois hauts-fourneaux à Dunkerque (qui produisent environ 7 Mt d'acier) et deux à Fos-sur-Mer (pour environ 4 Mt), pour la société ArcelorMittal, et le dernier sur le site de la société Saint Gobain à Pont-à-Mousson, qui ne produit que de la fonte.

A l'inverse, la filière électrique est plus territorialisée : elle compte une quinzaine de sites distribués essentiellement dans la moitié Est du territoire produisant chacun entre 30 kt et 500 kt d'acier par an. Ses acteurs sont historiquement des PME ou font partie d'un groupe international de taille moyenne. Contrairement aux hauts fourneaux, dont l'arrêt entraîne des dégradations importantes et dont le redémarrage est long et délicat, la production des sites de la filière électrique est relativement flexible, moyennant une pénalité énergétique.

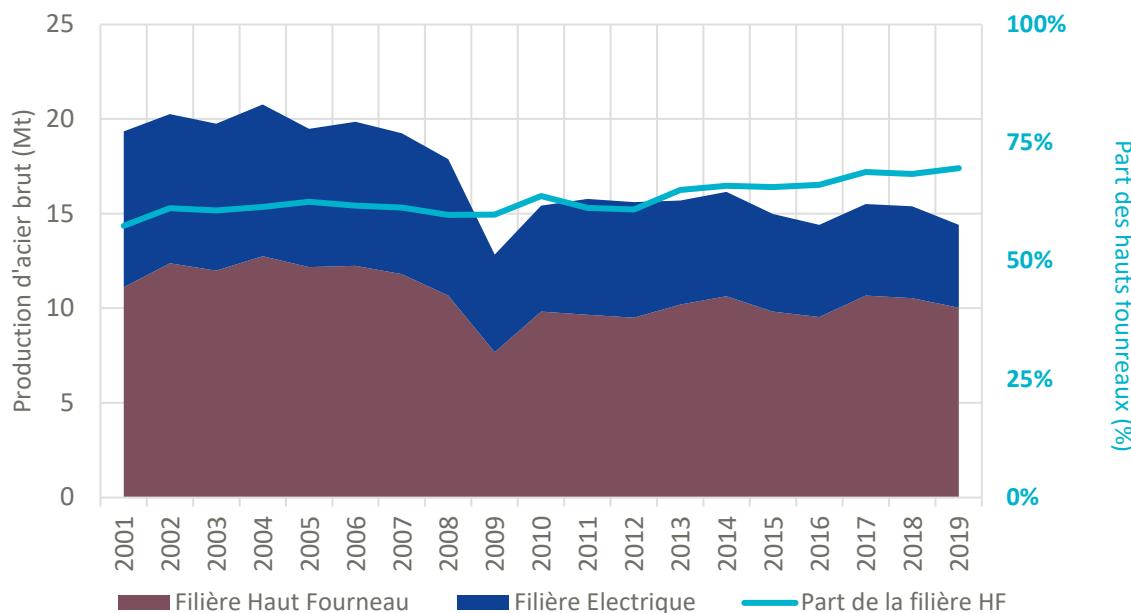


Figure 10: Production d'acier par filière en France (Source : World Steel Association).

Comme le montre la Figure 10, la production sidérurgique française a été fortement affectée par la crise de 2008, en particulier suite à la réduction de l'activité des secteurs du BTP et de l'automobile. Le choc conjoncturel s'est finalement transformé en nouvelle tendance de production structurelle autour de 15 Mt contre 20 Mt avant 2008.

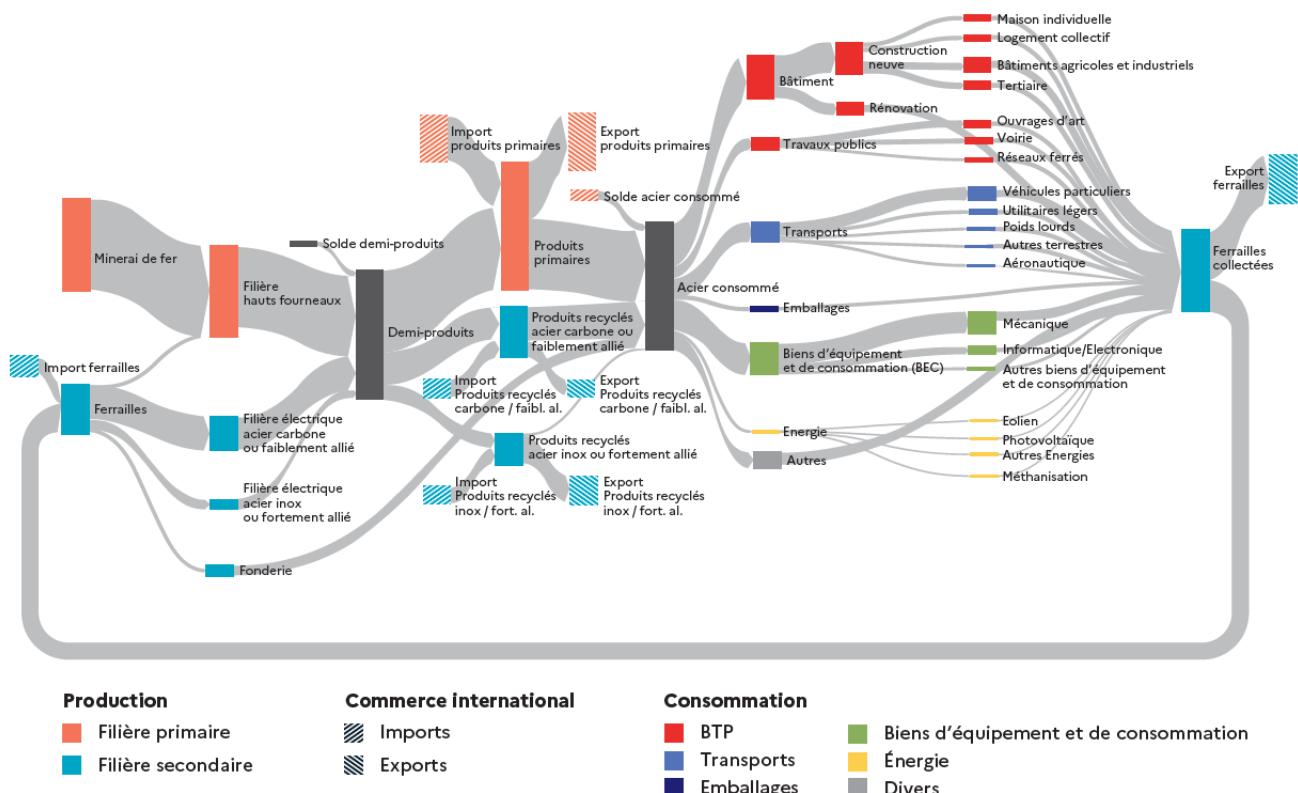
Cette période a ainsi été marquée par un certain nombre de fermetures de sites. Parmi les plus emblématiques figure celle de Florange en 2012. Au terme de plusieurs mois de conflit social, les deux derniers hauts fourneaux d'ArcelorMittal en

Lorraine sont arrêtés, pour progressivement laisser place au cours des années suivantes à plusieurs lignes de transformation de l'acier, alimentées par le site de Dunkerque. Concernant la filière électrique, des fermetures de capacités ont également eu lieu, comme celles d'ArcelorMittal à Gondrange en 2009 [3], l'usine d'Akers localisée à Thionville en 2016 [4] ou encore les usines Ascometal d'Allevard en 2015 et Leffrinckoucke en 2017. Cette restructuration de la filière à l'échelle globale aboutit à un taux d'utilisation des capacités de production aujourd'hui inférieur à 80 %⁹.

A l'horizon 2030 et 2050, les projections d'évolution de la production des sites sidérurgiques français intégrés dans le périmètre du PTS dépendent des hypothèses sur l'évolution de la demande des différents secteurs consommateurs (sous partie 2.2), ainsi que celles sur la physionomie du commerce international et la place de l'industrie sidérurgique française à moyen et long terme dans cette nouvelle configuration mondiale (sous partie 2.3).

2.2. Des usages de l'acier centrés sur le BTP, les équipements et la mobilité

La Figure 11 représente les flux d'acier de l'extraction du minerai de fer à sa fin de vie et en passant par sa transformation en matière première de recyclage. Bien que déjà complexe, cette illustration reste simplifiée car elle masque une réalité dans laquelle cohabitent de nombreuses étapes de transformation à partir du demi-produit jusqu'au produit fini en acier, qui *in fine*, est inséré en tant que composant d'un bien de consommation finale. En plus de mettre en lumière la forte complexité de la chaîne de valeur, la Figure 11 distingue les deux principales voies de production d'acier évoquées en partie 3 (*i.e.* filière haut fourneau et filière électrique) ainsi que la filière « fonderie », dont les sites de production se situent en dehors du périmètre de ce plan de transition sectoriel.



Note de lecture : Sur la partie en amont de « l'acier consommé », à chaque nœud correspond un stock en équivalent acier, alimenté par des importations et une production nationale et dont sort un flux vers les marchés extérieurs et un autre à destination du marché domestique. Le solde d'acier indirect est une estimation du tonnage d'acier contenu dans les produits consommés par les secteurs. Il s'avère positif car l'acier contenu dans les importations est supérieur à l'acier contenu dans les exportations et vient donc alimenter l'empreinte acier de la consommation finale française, répartie entre les différents usages.

Figure 11: Diagramme de Sankey de l'acier en France en 2014 (source : estimations ADEME sur la base de la cartographie des données issue de l'outil MODEIRE cf. encadré page suivante)

⁹ Echanges avec les industriels du secteur.

Encadré 2 : l'outil MODEIRE comme cartographie et modélisation des flux de matériaux

MODEIRE (MOdélisation DEcarbonation de l'Industrie Ressources-Energie) est une cartographie de flux de matières et un outil de modélisation Excel, développé dans le cadre d'un partenariat entre l'ASSOCIATION NEGAWATT et l'ADEME. Il a pour but d'évaluer les niveaux de demande en matériaux issus de l'industrie, notamment ceux issus des 9 secteurs industriels les plus énergo-intensifs (acier, aluminium, ciment, verre, dichlore, ammoniac, éthylène, papier/carton et sucre), à partir de scénarios d'évolution des marchés consommateurs de ces matériaux (mécanique, électricité, textile, transport, etc.). Ces scénarios sont obtenus à partir d'hypothèses faites sur un jeu de plus de 600 paramètres à horizon 2050 (ex. : démographie, taux de recyclage, consommation en biens d'équipement par habitant, nombre de kilomètres parcourus en véhicule). Utilisé dans le cadre d'autres Plans de Transition Sectoriels, l'outil permet d'estimer les niveaux de déchets produits chaque année et intègre désormais des hypothèses sur l'économie circulaire.

En tenant compte de l'acier contenu dans les biens importés et en excluant celui des biens exportés (empreinte matière), la consommation finale d'acier en France est estimée à 16,5 Mt/an. Elle se répartie entre 6 macro-secteurs dont les Bâtiments Travaux Publics - BTP (43 %), les Biens d'Équipement et de Consommation - BEC (25 %) et les transports (15 %). Une quantité importante d'acier (12% de la consommation finale) est également consommée dans une multitude de produits finis et pour lesquels la traçabilité des flux est complexe. Ces usages ne se rattachent pas à un macro-secteur en particulier et sont donc fléchés vers un poste de consommation « Autres » (Figure 12).

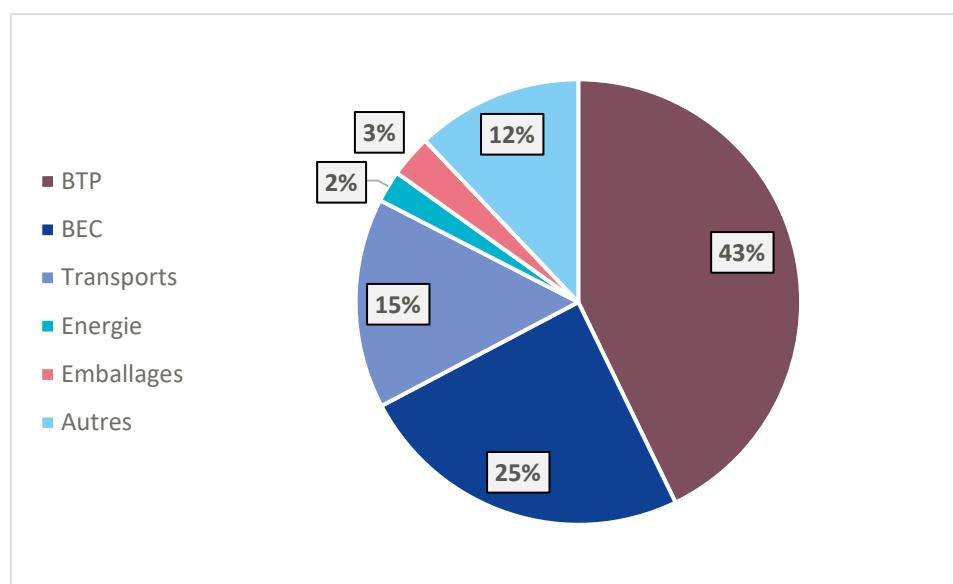


Figure 12: Répartition de la consommation finale d'acier en France en 2014 (source : estimations ADEME sur la base de la cartographie des données issue de l'outil MODEIRE)

Par ailleurs, l'acier existe sous de nombreuses nuances d'alliages, chacune plus ou moins adaptée à chaque usage. Les aciers dits « carbone » ou faiblement alliés sont par exemple plutôt employés dans le secteur de la construction (poutres, ronds à béton ...). De son côté, l'acier inox est apprécié pour ses qualités esthétiques en plus de ses propriétés de durabilité et de résistance à la corrosion. Il est par exemple utilisé dans les machines à laver, dans les casseroles, pour les pots d'échappement ou parfois pour l'intérieur des ascenseurs.

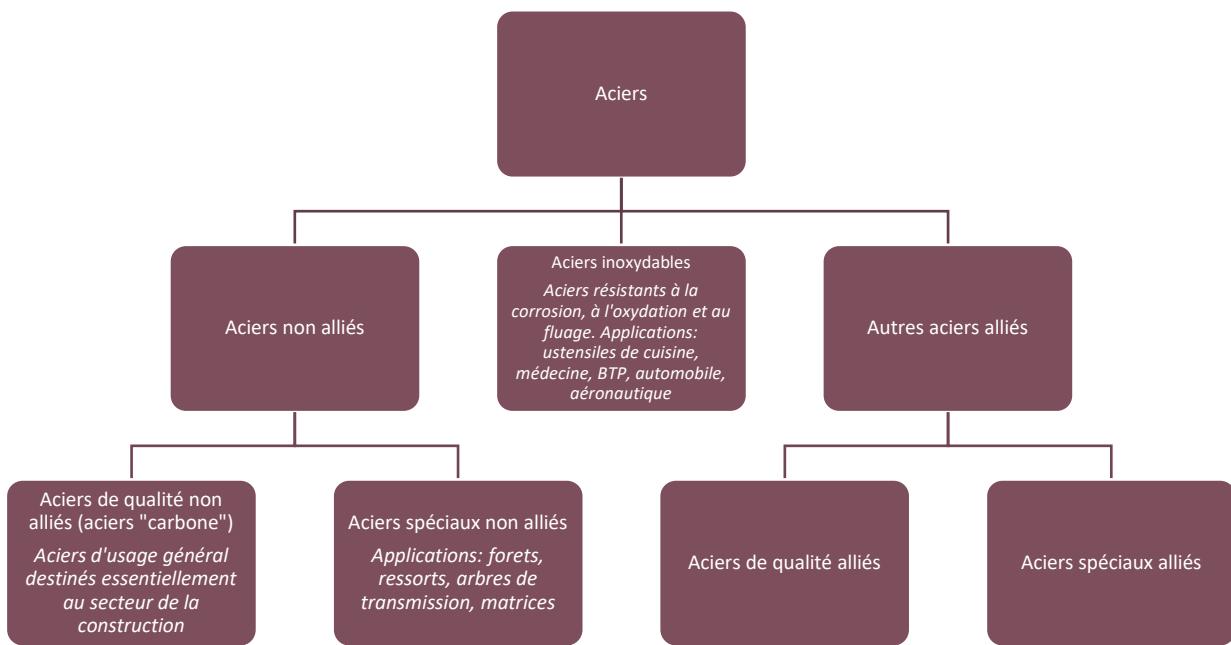


Figure 13: Classification des principaux aciers selon la norme NF EN 10020¹⁰

La typologie des aciers selon leur niveau d'alliage et leur utilisation finale peut être complétée par une distinction selon la forme que prennent les demi-produits sidérurgiques. Ainsi, les « brames » sont des blocs d'acier de forme parallélépipédique destinés à être transformés en produit plats, c'est-à-dire en bobines, tôles ou plaques. Les billettes et les blooms prennent la forme de produits longs de section carrée, cylindrique ou rectangulaire et destinés à devenir des barres d'acier, des poutrelles et profilés ou encore du fil d'acier.

En France, la filière hauts fourneaux produit essentiellement des aciers plats carbone ou faiblement alliés que l'on nommera par la suite « produits primaires » ou « produits plats ». La filière électrique produit des aciers longs carbone ou faiblement alliés et des aciers inox et fortement alliés, que l'on regroupera par la suite par les appellations « produits recyclés » ou « produits longs ». La Figure 14 illustre les débouchés de chacune de ces deux filières et montre que les sites sont inégalement sensibles aux fluctuations de demande : ceux de la filière hauts fourneaux, aux débouchés diversifiés, le sont moins que ceux de la filière électrique dont les débouchés sont davantage concentrés sur des secteurs spécifiques, notamment le bâtiment.

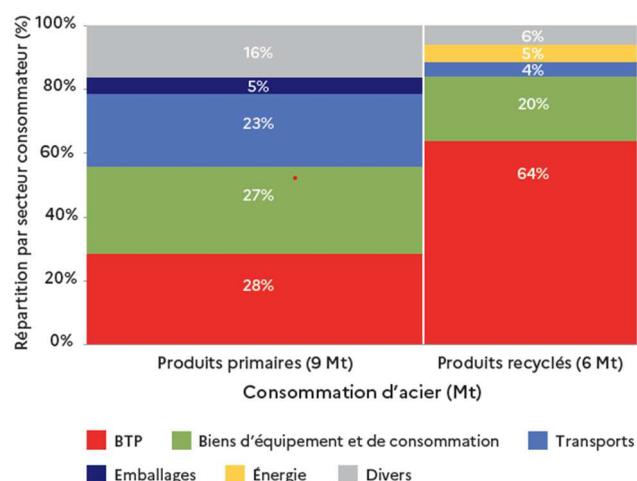


Figure 14. Répartition de la consommation finale de produits primaires et recyclés en France (source : estimations ADEME sur la base des données de l'étude négaWatt pour le compte de l'ADEME et la création de l'outil MODEIRE)

En matière de prospective, des hypothèses sur l'évolution des usages des biens contenant de l'acier permettent d'estimer le pourcentage d'évolution de la demande finale en acier sur le marché français. A titre d'exemple, dans le bâtiment et les travaux publics, la tendance baissière actuelle devrait s'intensifier en lien avec l'objectif d'atteinte du zéro artificialisation

¹⁰ Les « aciers non alliés » se disent également « aciers faiblement alliés »

nette (ZAN) des sols en 2050, issu de la Loi Climat et Résilience de 2021. Si cette dynamique se confirme, la filière des aciers longs carbone serait particulièrement affectée, nécessitant une diversification de ses débouchés. La concurrence des matériaux biosourcés face au béton armé dans les structures de bâtiment pourrait également avoir un effet sur la demande en aciers en provenance des acteurs du BTP. Dans le secteur de l'énergie, le déploiement des énergies renouvelables devrait augmenter le besoin en acier. Toutefois, les équipements de production d'énergies renouvelables sont aujourd'hui essentiellement produits en dehors de l'Union Européenne. Ce n'est donc qu'à condition d'une politique de réindustrialisation que cette tendance haussière pourrait profiter aux sites sidérurgiques français – ainsi qu'au reste de l'amont de la chaîne de valeur. Dans le secteur des transports, la tendance est plus incertaine. Une plus faible utilisation de la voiture pour les déplacements domicile-travail – liée au télétravail, au covoiturage ou au report modal vers le train ou le vélo, pourrait limiter l'usure du parc automobile et donc les besoins en acier pour son renouvellement. De même, l'usage d'aluminium et de plastiques, moins pondéreux, tend à se substituer à la consommation d'acier pour la conception des véhicules. Par ailleurs, la réglementation européenne sur l'interdiction de vente des véhicules thermiques en 2035 alimente une incertitude sur les besoins en acier pour l'automobile.

2.3. Une dégradation du solde commercial de la sidérurgie française et des perspectives d'évolution très incertaines

A tous les niveaux de sa chaîne de valeur, l'acier est une matière fortement intégrée dans le commerce international. Les flux d'importations et d'exportations à l'échelle mondiale n'ont cessé de croître sous l'impulsion des besoins des pays en développement et de la baisse des barrières aux échanges. En France, les dynamiques sont néanmoins propres à chaque type d'acier :

- Pour les aciers plats primaires, environ 70% de la consommation et de la production françaises font l'objet d'échanges commerciaux, essentiellement depuis et vers les pays de l'UE¹¹.
- Pour certains aciers inox et fortement alliés, les sites français ciblent des marchés de niche, d'où une production presque entièrement exportée à destination du monde entier.
- Pour les aciers longs carbone, notamment ceux à destination du bâtiment, les échanges sont moindres et s'établissent à l'échelle régionale.

Entre 2014 et 2019, le solde commercial¹² français de l'acier s'est dégradé dans l'ensemble des filières (Figure 15). Le solde en aciers plats est ainsi passé d'une situation excédentaire à déficitaire, tandis que le déficit du solde des produits longs carbone s'est fortement creusé.

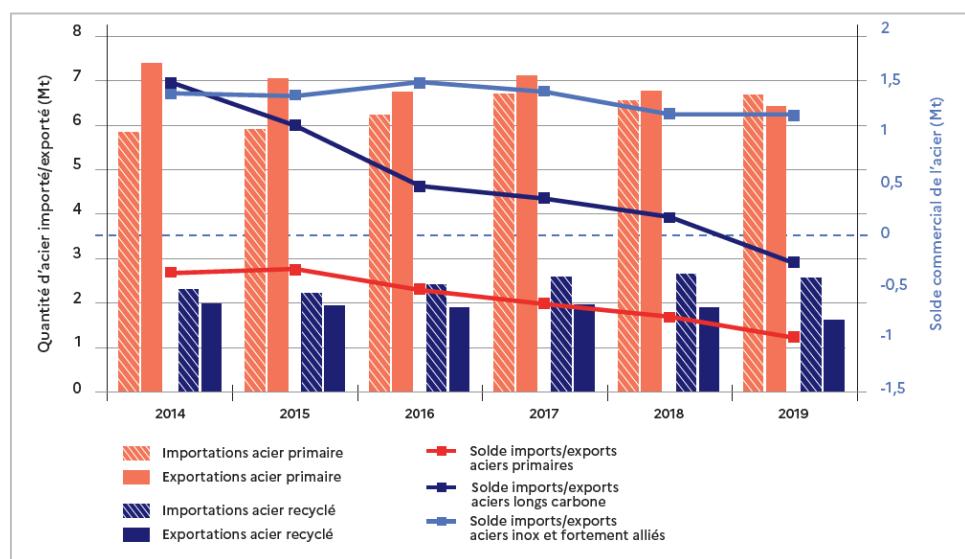


Figure 15. Évolution des importations et exportations d'acier de 2014 à 2019, par type de produits (source : ADEME sur la base des données UN Comtrade)

Si ces données reflètent le constat d'une probable perte de compétitivité des industriels français par rapport à leurs concurrents, des études approfondies permettraient de mieux mettre en lumière les raisons. A titre d'exemple, les surcapacités de production constatées à l'échelle mondiale alimentent le décalage entre offre et demande (e.g. en 2017, le

¹¹ Ces échanges avec l'Union Européenne masquent cependant des échanges plus globaux. La Belgique et les Pays-Bas abritent en effet les ports d'Anvers et de Rotterdam, qui sont des plateformes majeures du commerce international.

¹² Solde commercial en volume (i.e. différence entre la masse d'acier exportée et la masse d'acier importée).

taux d'utilisation des capacités était estimé à 75%), tirent les prix vers le bas et exacerbent la concurrence [5]. Dans ce contexte, les entreprises dont les économies d'échelles sont plus difficiles à atteindre et/ou positionnées sur les segments de marché les plus concurrentiels se retrouvent en difficulté. Dans certains cas, les entreprises sont intégrées par de plus grands groupes, et les sites sont soit fermés, soit restructurés. Comme évoqué précédemment, les capacités de production de la filière ont été progressivement réduites après 2010. Ceci a pour conséquence une réduction de la propension de la France à exporter et dans le même temps, une plus grande dépendance aux importations. Approfondir les explications du creusement de ce solde et identifier des pistes d'actions pour en inverser la tendance, nécessiterait de distinguer les différents marchés sur lesquels les acteurs français sont positionnés, les facteurs de compétitivité de ces marchés ainsi que le positionnement des principaux concurrents actuels et potentiels concurrents futurs à horizon 2030, voire 2050.

Par simplification, les hypothèses de prospective liées à l'évolution du commerce international qui ont été prises dans la modélisation, distinguent seulement les trois types d'acier précédemment évoqués : acier plat carbone, acier longs carbone et acier inox/fortement alliés (section 4.2.2). A l'instar des évolutions sur le marché domestique, cette typologie simplificatrice permet de refléter de probables évolutions différenciées entre ces trois segments mais masquent probablement des spécificités propres aux débouchés, en France et sur les marchés extérieurs, de chaque « sous-segment ».

2.4. Zoom sur les intrants matière

2.4.1. Minerai de fer

Le minerai de fer est une ressource répartie inégalement à l'échelle de la planète et son exploitation est très concentrée géographiquement. Cinq pays pèsent à eux seuls pour presque 80 % de la production mondiale : l'Australie, le Brésil, la Chine, l'Inde et la Russie. En rajoutant le Canada, l'Afrique du Sud, l'Ukraine, les Etats-Unis et la Suède, ce sont dix pays qui se partagent presque 95 % de la production mondiale [6]. Entre 1998 et 2017, cette production mondiale a été multipliée par 2,5 avant de commencer à atteindre un plateau (Figure 16).

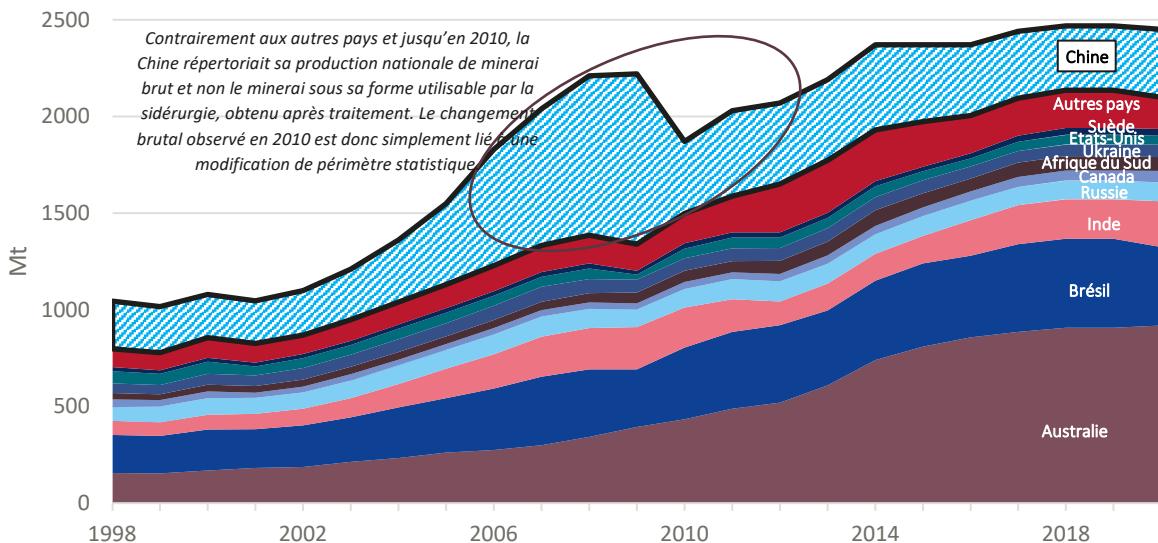


Figure 16: Évolution de la production mondiale de minerai de fer par pays (source : USGS)

La France ne produisant plus de minerai de fer, elle l'importe désormais principalement en provenance du Canada et du Brésil, qui à eux deux représentaient environ 75 % des importations en 2021 (Figure 17). Depuis une vingtaine d'année, la structure des importations françaises a foncièrement évolué. Le volume total de minerai de fer importé a structurellement chuté d'environ 5 Mt depuis la crise financière, résultat direct de la baisse de la production française d'acier primaire et de la fermeture de certaines capacités. De plus, le Canada qui ne pesait que pour une faible part des importations au début des années 2000 est maintenant devenu le premier pays fournisseur de la France. Parallèlement, les importations en provenance d'Australie et de Mauritanie ont quasiment disparu tandis que la part du Brésil a diminué. Les prix moyens à l'importation ont aussi beaucoup évolué depuis 20 ans. Avant 2005, le prix du minerai de fer n'était pas le résultat de la confrontation entre l'offre et la demande mais l'aboutissement de négociations de gré à gré entre les principaux sidérurgistes mondiaux et les entreprises d'extraction minière. Le choc de demande d'acier en provenance de Chine a provoqué une hausse du prix du minerai de fer, tout comme une modification du régime de fixation de ce prix après 2008 dont la conséquence directe est une plus grande volatilité. In fine, le prix du minerai de fer résulte aujourd'hui de la confrontation entre une demande essentiellement en provenance de Chine et une offre majoritairement contrôlée par quelques grands groupes miniers [7].

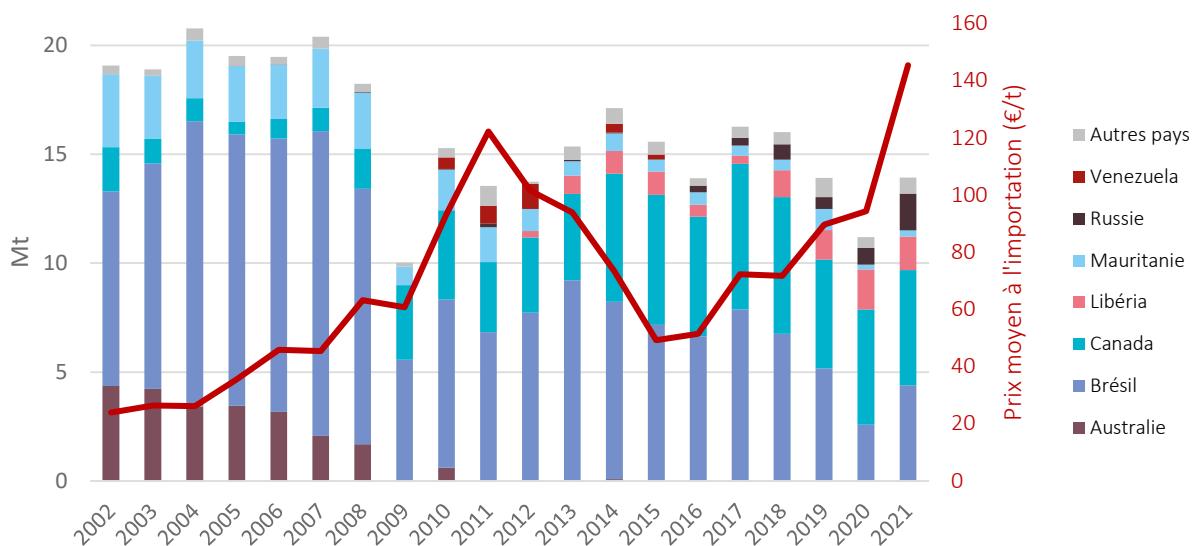


Figure 17 : Importations de minerai de fer en France selon les origines (source : ADEME sur la base des données UN Comtrade¹³)

2.4.2. Métaux d'addition

Aujourd'hui, l'acier existe sous plusieurs milliers d'alliages produits par ajout de métaux d'additions qui lui permettent d'améliorer certaines propriétés. L'explosion du nombre de nuances d'acières est relativement récente : environ 40 % des alliages produits à ce jour ont été élaborés lors des 50 dernières années [5]. Pour certains aciers spéciaux, les métaux d'alliages peuvent avoir une part très élevée comme le nickel qui peut représenter jusqu'à 40 % de l'alliage [8]. Le Tableau 1 donne quelques exemples de métaux d'alliage, les caractéristiques qu'ils peuvent apporter en complément de l'acier ainsi que certaines applications pour lesquelles ils sont utilisés. Le cours des éléments d'alliages fluctue fortement ce qui pousse les sidérurgistes à essayer de réduire leur part dans les produits finaux qu'ils proposent aux clients. La tendance est par exemple à la baisse du contenu en nickel et en cuivre [9]. Ces métaux qui influencent fortement les propriétés de l'acier sont apportés lors de la phase de métallurgie secondaire, en général sous la forme de ferroalliages. Les ferroalliages sont des composés métalliques contenant du fer et d'autres métaux, commercialisés comme des « ingrédients » pour la sidérurgie.

Elément d'alliage	Impact sur les propriétés de l'acier	Applications
Chrome (Cr)	<ul style="list-style-type: none"> Résistance mécanique à chaud Résistance à l'oxydation Résistance à la corrosion Augmente la trempabilité et la résistante à la traction 	<ul style="list-style-type: none"> Acier inoxydable : teneur élevée en chrome. D'autres composants peuvent venir améliorer certaines propriétés (nickel, molybdène, titane) Acier chromoly : acier chrome-molybdène utilisé pour des usages haute-résistance et haute-température Industrie nucléaire
Manganèse (Mn)	<ul style="list-style-type: none"> Elément désoxydant Améliore l'usinabilité par la formation de sulfures Bonne résistance à l'usure Augmente la trempabilité Augmente la résistance à la traction 	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication de rails
Molybdène (Mo)	<ul style="list-style-type: none"> Résistance à haute température Résistance à l'usure 	<ul style="list-style-type: none"> Acier inoxydable : teneur élevée en chrome. D'autres composants peuvent venir améliorer certaines propriété (nickel, molybdène, titane) Acier chromoly : acier chrome-molybdène utilisé pour des usages haute-résistance et haute-température
Titane (Ti)	Réduit le risque d'oxydation des aciers inoxydables	
Vanadium (V)	<ul style="list-style-type: none"> Augmente la trempabilité Relève la température de surchauffe Résistance à l'usure et aux déformations 	

Tableau 1: Exemples de métaux d'alliage, leurs caractéristiques et potentielles applications [10], [11], [12], [13]

¹³ Code douanier : 2601 - Minéraux de fer et leurs concentrés, y.c. les pyrites de fer grillées [cendres de pyrites]

En France, les volumes de ferroalliages en jeu sont relativement faibles (plusieurs kt) au regard des volumes d'acier produits (plusieurs Mt) mais il s'agit d'éléments absolument essentiels pour la sidérurgie sans lesquels il ne serait pas possible de conférer les propriétés nécessaires aux différents alliages.

Comme l'illustre la Figure 18, les échanges commerciaux de ferroalliages sont relativement équilibrés. Les principaux types de ferroalliages échangés sont le ferrosilicomanganèse (FeSiMn), le ferromanganèse (FeMn), le ferrochrome (FeCr), le ferronickel (FeNi) et le ferrosilicium (FeSi). Parmi les autres types de ferroalliages, il y a par exemple du ferrotungstène (FeW), du ferromolybdène (FeMo), du ferrovานadium (FeV) ou encore du ferroniobium (FeNb).

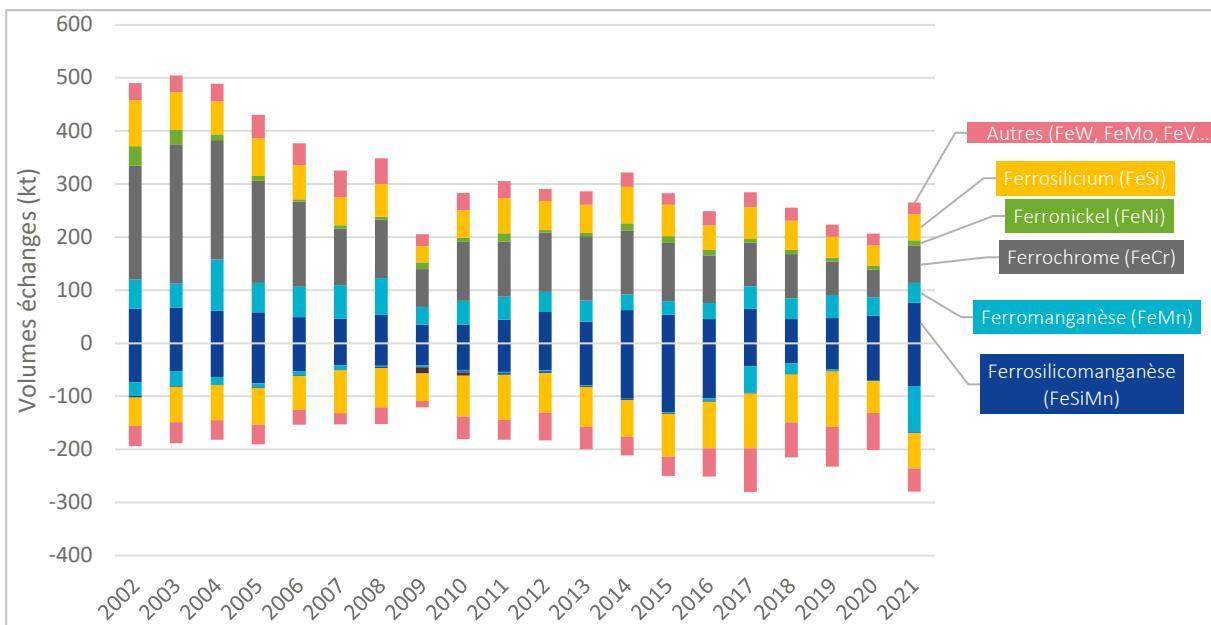


Figure 18 : Imports (+)/Exports (-) de ferroalliages en France selon les différents types (source : données douanes¹⁴).

Encadré 3 : zoom sur les aciers inoxydables

Au sens de la norme NF EN 10020, les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. Ils sont ensuite subdivisés en deux sous-catégories selon que leur teneur en nickel est inférieure ou supérieure à 2,5 %. Ces aciers présentent trois caractéristiques principales : résistance à la corrosion, résistance à l'oxydation à chaud et résistance au fluage (phénomène qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte). Comme de nombreuses commodités, le marché est dominé par la Chine qui pèse pour 58 % de la production mondiale d'acier inoxydable contre 12 % pour l'Europe [14].

Parmi toutes les nuances existantes, l'acier inox 304 issu de la série 300 est le plus largement répandu. En Europe, il représentait 51,6 % de la production d'acier inoxydable en 2021. Il est très utilisé dans les appareils de cuisine, dans l'industrie agro-alimentaire ou encore dans les échangeurs thermiques [14]. Il s'agit d'un acier austénitique avec une teneur en nickel de 8-10,5 % et une teneur en chrome de 18-20 %.

Il existe plusieurs mix d'intrants matières possibles pour la production d'acier inoxydable qui relèvent essentiellement d'un arbitrage économique et de la disponibilité en matières premières selon la zone géographique. R. Gyllenram & W. Wei (2022) [14] ont réalisé une étude d'empreinte carbone pour la production d'acier inox 304 pour trois différentes régions : l'Europe, la Chine et l'Indonésie (qui représente 9 % de la production mondiale). Pour calculer cette empreinte, les mix matières moyens utilisés pour la production d'acier inox 304 ont été modélisés (Figure 19). Pour la Chine, trois différents mix matière (correspondant aux lettres A, B et C) représentant trois grandes stratégies de production couramment employées ont été considérés. La « moyenne » Chine se base sur une pondération de 80 % mix A, 15 % mix B et 5 % mix C. Alors que les producteurs européens (et également français en l'occurrence) utilisent essentiellement de la ferraille inox en tant qu'intrant matière, les producteurs chinois et indonésiens utilisent une part importante de fonte brute de nickel (abrégée NPI pour « Nickel Pig Iron » en anglais). La fonte brute de nickel (1-15% Ni) a été initialement développée en Chine comme alternative bon marché aux autres sources de nickel que sont le ferronickel (20-30 %) et le nickel pur. Depuis l'interdiction d'export de mineraux de nickel en Indonésie en 2014, les capacités de NPI se sont fortement

¹⁴Codes douaniers : [720230] pour la catégorie « Ferrosilicomanganèse » ; [720211] et [720219] pour la catégorie « Ferromanganèse » ; [720241] et [720249] pour la catégorie « Ferrochrome » ; [720260] pour la catégorie « Ferronickel » ; [720221] et [720229] pour la catégorie « Ferrosilicium » ; [720250], [720270], [720280], [720291], [720292], [720293] et [720299] pour la catégorie « Autres (FeW, FeMo, FeV ...) ».

développées dans le pays jusqu'à ce que la production dépasse finalement celle de la Chine en 2020 faisant ainsi de l'Indonésie le premier producteur mondial de NPI [14].

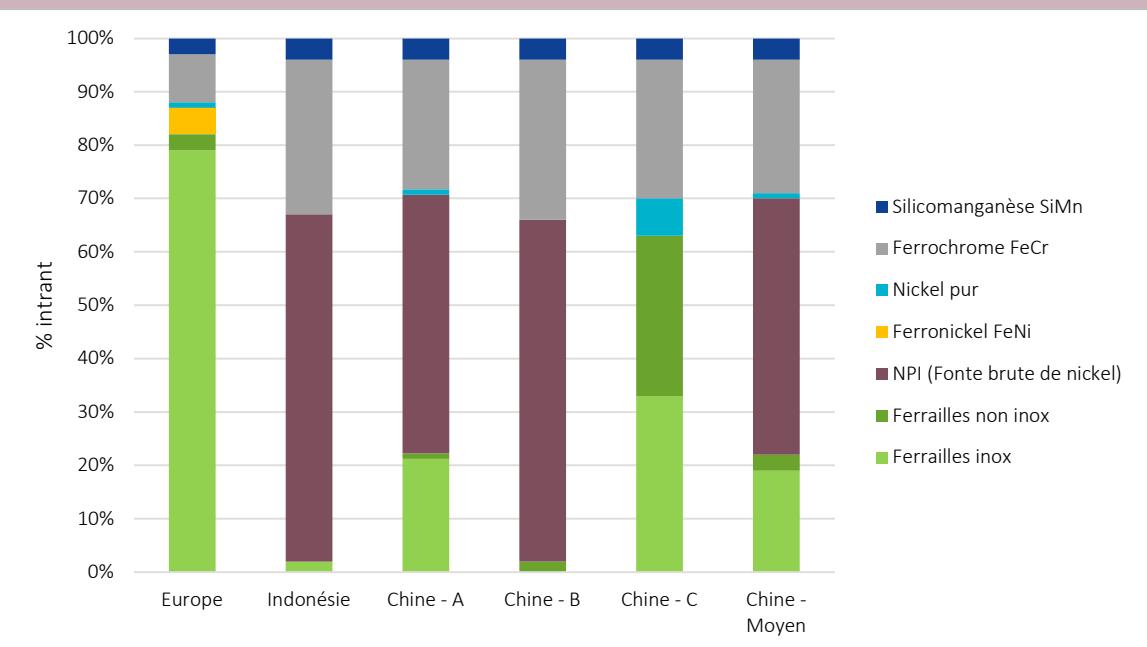


Figure 19 : Mix d'intrants matières pour la production d'une tonne d'acier inox 304 en Europe, Indonésie et Chine [14].

Le choix du mix matière ainsi que le contenu carbone du mix électrique utilisé pour produire les intrants constituent les deux principaux déterminants de l'empreinte carbone de l'acier inoxydable. La Figure 20 montre les résultats du calcul d'empreinte carbone de l'acier inox 304 [14]. Alors que les émissions de scope 1 (seules prises en compte dans le périmètre du PTS) représentent de l'ordre de 0,1 à 0,3 tCO₂e/t_{acier}, la prise en compte des émissions de scope 3 a pour effet de porter l'empreinte carbone à presque 2 tCO₂e/t_{acier} dans le cas de l'Europe et à plus de 10 tCO₂e/t_{acier} dans le cas de l'Indonésie.

La Figure 19 et la Figure 20 illustrent le fait que le principal enjeu environnemental associé à la production d'acier inoxydable se situe dans le contenu carbone des intrants (plus particulièrement des éléments d'alliage) et non dans les émissions directes. Le cadre méthodologique des Plans de Transition Sectoriels ne permet pas de traiter quantitativement ces émissions indirectes même si celles-ci, dans le cas de l'acier inoxydable du moins, mériteraient amplement d'être prises en compte dans un futur exercice de prospective.

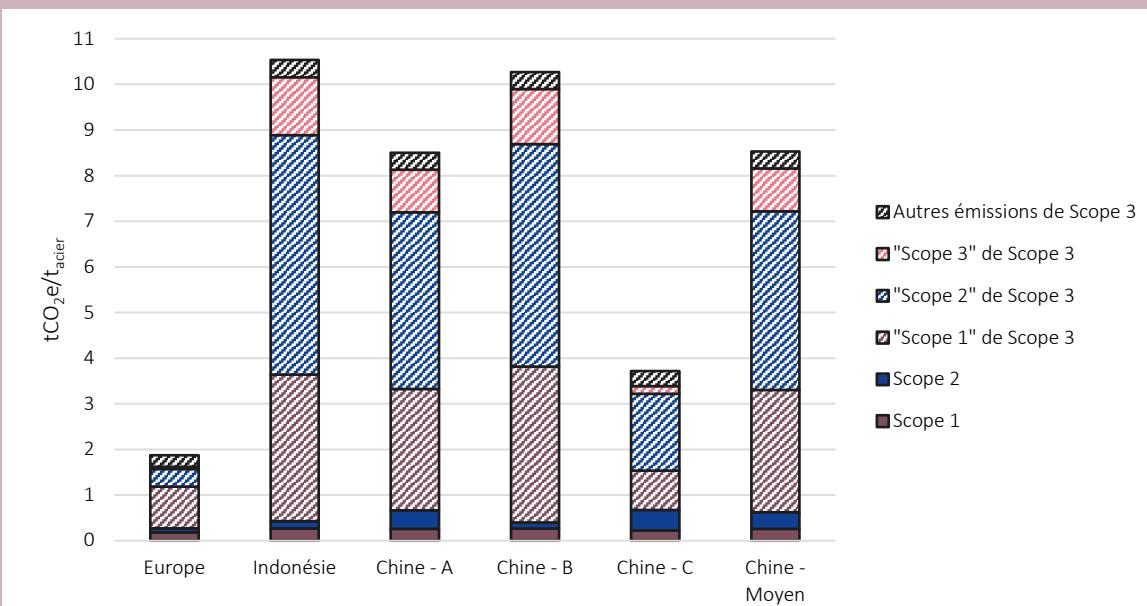


Figure 20: Empreinte carbone d'une tonne d'acier inox 304 en Europe, Indonésie et Chine [15]

2.4.3. Les ferrailles

2.4.3.1. Enjeux quantitatifs

Comme évoqué précédemment, la filière électrique dépend exclusivement d'un approvisionnement suffisant en ferrailles pour sa production. Cet approvisionnement peut à la fois provenir des chutes de fabrication industrielle, et dans ce cas présente l'avantage d'une meilleure connaissance de la composition du gisement, mais aussi et surtout des produits en fin de vie contenant de l'acier, on parle alors de ferrailles externes. La Figure 21 présente de manière synthétique les possibilités de fin de vie des produits contenant de l'acier¹⁵.

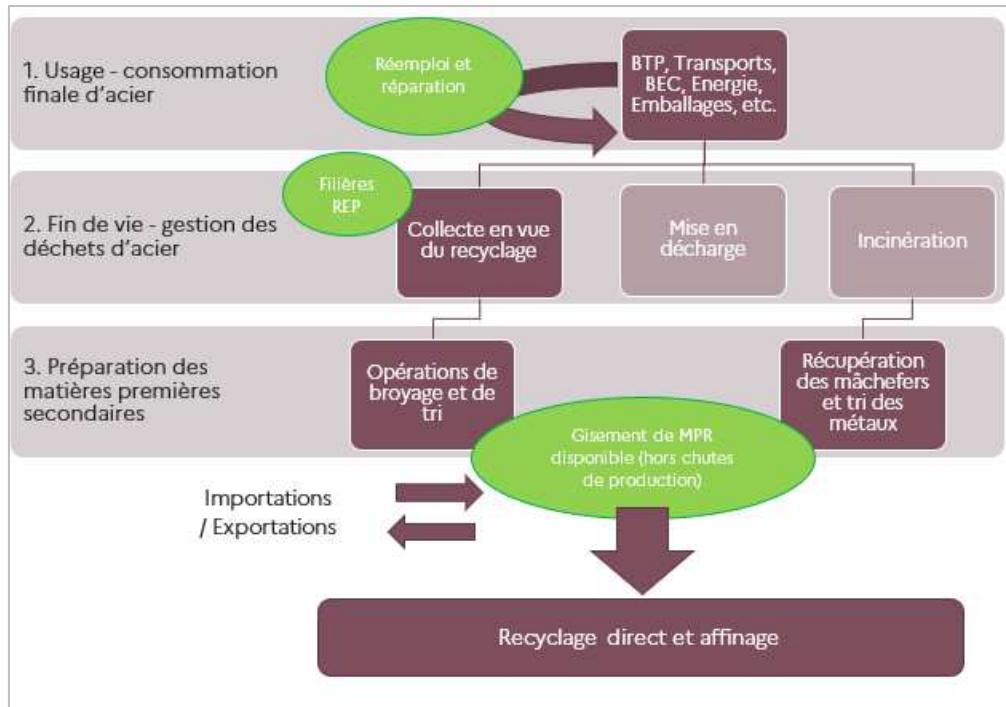


Figure 21: Schéma simplifié de la construction d'un gisement de ferrailles

Avant d'être considéré comme « déchet », les produits usagés peuvent bénéficier d'une prolongation de leur durée de vie à travers les politiques de réemploi ou de réparation¹⁶. Ces activités, dont une partie est rattachée à l'économie sociale et solidaire, améliorent l'efficacité matière en réduisant, toute chose égale par ailleurs, la demande en biens finaux. Elles permettent ainsi de préserver les ressources et réduisent mécaniquement les émissions de CO₂ associées aux systèmes productifs. En revanche, elles ont l'inconvénient de limiter le gisement de déchets potentiellement disponible pour les industriels. Une fois l'arrivée du produit en fin de vie, trois grandes voies s'opposent : la collecte en vue du recyclage, la mise en décharge et l'incinération. Le gisement d'acier peut ainsi se retrouver dans l'une ou l'autre de ces voies en fonction du type de produit dans lequel il est incorporé, et du geste de tri. Même si des quantités de déchets d'acier peuvent être récupérées à l'issue de l'étape d'incinération (dans les mâchefers), la principale voie favorisant la disponibilité de ces déchets pour les industriels est celle de la collecte en vue du recyclage, essentiellement dans la filière électrique et les fonderies, mais également, dans une faible mesure, dans la filière hauts fourneaux en complément de la valorisation des chutes de production¹⁷. Cette collecte est néanmoins particulièrement complexe du fait de la dispersion des produits en acier selon leurs multiples usages. Bien que la traçabilité soit complexe et que le gisement national de ferrailles ne soit pas connu avec certitude, un travail de rebouclage des flux a été mené dans le cadre du travail sur l'outil de modélisation MODEIRE (encadré 2, sous-partie 2.2) et sur la base des données du Bilan National du Recyclage de l'ADEME¹⁸. Ainsi, il apparaît que le secteur du BTP est celui dont le volume de ferrailles collectées est le plus important. Ces estimations ne traduisent pas l'efficacité de

¹⁵ Note : Les filières REP (Responsabilité Élargie du Producteur) apparaissent sur le schéma au niveau de la collecte et en vue du recyclage mais interviennent de manière plus globale sur la gestion de la fin de vie des produits et même en amont, sur la prévention des déchets et l'écoconception. Plus d'informations disponibles ici : <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/filières-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep/fonctionnement-filiere-rep>

¹⁶ Plus d'informations disponibles ici : <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation>

¹⁷ Dites « ferrailles internes » : ce sont les déchets d'acier pré-consommation.

¹⁸ Plus d'informations disponibles ici : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6959-bilan-national-du-recyclage-bnr-2012-2021.html>

la collecte dans chaque secteur mais donnent néanmoins une indication des gisements mobilisables à l'avenir et sur la qualité de ce gisement.

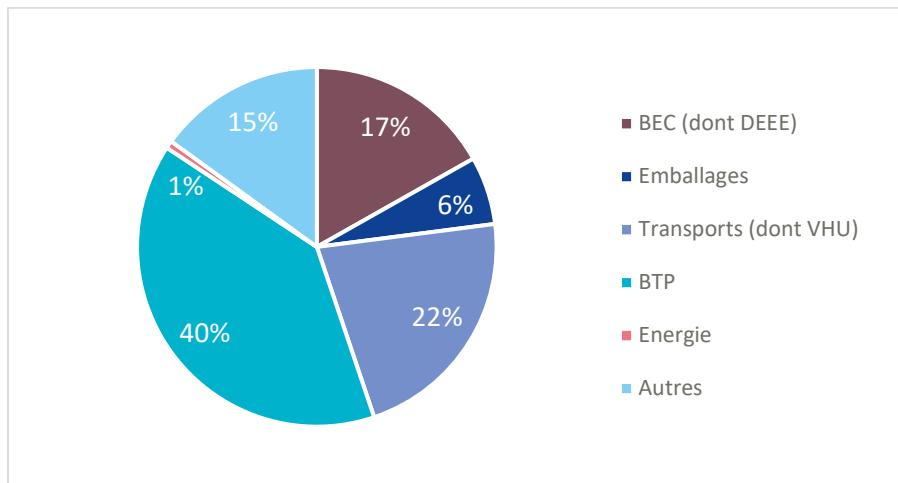


Figure 22: Secteurs d'origine des ferrailles en France en 2014 (source : ADEME sur la base des données de l'étude négaWatt pour le compte de l'ADEME)

Par ailleurs, comme de nombreux biens de consommation, les ferrailles sont soumises à des échanges internationaux. En Europe, ce marché est fortement régionalisé : les principaux échanges ont lieu entre pays européens. En exportant ses ferrailles, essentiellement à destination de ses proches voisins (Belgique, Espagne, Italie), la France est un exportateur net.

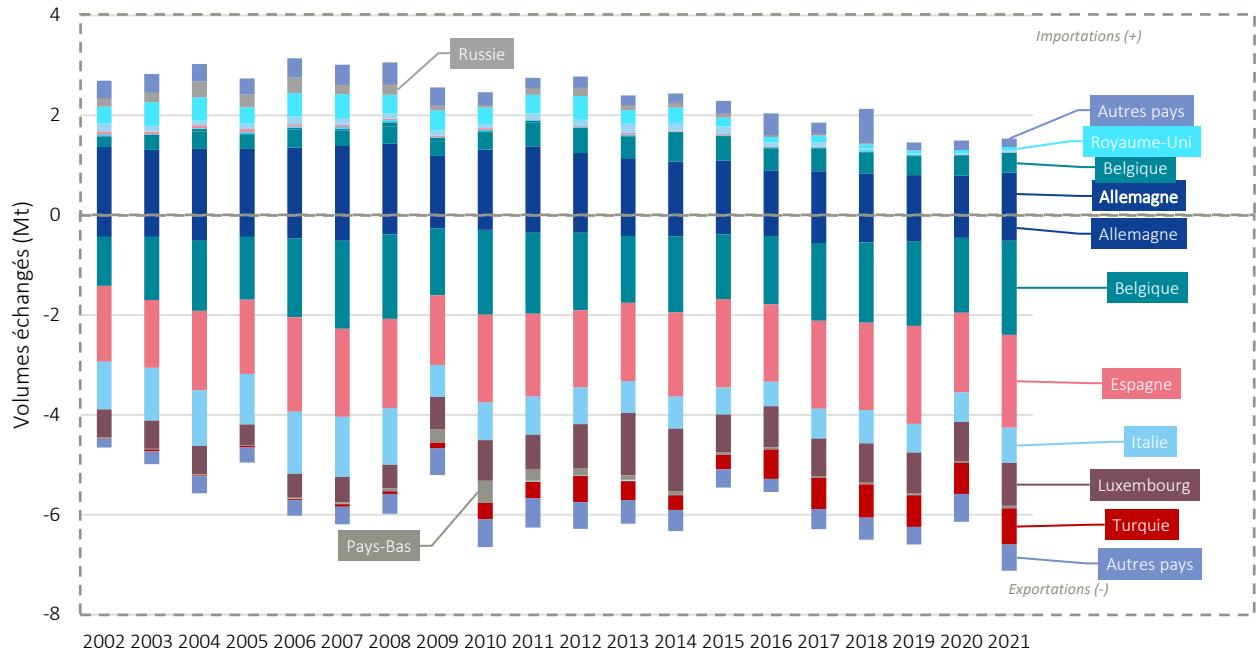


Figure 23 : Importations (+) et exportations (-) de déchets en France selon les pays de provenance/destination (source : UN Comtrade¹⁹).

Une étude approfondie sur le recyclage des grands métaux, dont l'acier fait partie, a été publiée en mars 2024. Elle vise à mieux connaître et quantifier les gisements disponibles pour le recyclage en France et identifier des pistes de solutions permettant d'améliorer le taux de recyclage de ces métaux. Parmi ces pistes, l'étude propose de mettre en place une incitation à l'intégration de matières premières de recyclage dans les produits finis via un « label contenu recyclé ». Une estimation des tendances de consommation à horizon 2030 et leurs impacts sur la circularité des métaux, est également proposée dans cette étude ²⁰.

¹⁹ Code douanier 7204 – Déchets et débris de fonte, de fer ou d'acier [ferrailles].

²⁰ ADEME, Pierrick DRAPEAU, Louis OLLION, Guillaume BOUYER. 2023. Étude du potentiel de recyclage de l'acier, de l'aluminium et du cuivre en France. 206 pages. Plus d'informations disponibles ici : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6958-etude-du-potentiel-d-amelioration-du-recyclage-des-metaux-en-france.html>

2.4.3.2. Qualité des ferrailles

Il existe plusieurs qualités de ferraille qui ne permettent pas toutes de produire les mêmes types d'acier. Les deux principaux paramètres qui permettent d'établir la qualité d'une ferraille sont la présence d'éléments résiduels qu'elle contient (essentiellement cuivre, étain, chrome, nickel et molybdène dont la somme peut être utilisée comme un proxy de la qualité des ferrailles) et la présence de résidus non métalliques sur sa surface (restes de béton, peinture, matière organique ...). Le cuivre est particulièrement problématique car il se mélange souvent avec l'acier pendant la phase de récupération et de préparation de certaines ferrailles du fait de la présence résiduelle de câbles électriques dans des voitures destinées au recyclage. Contrairement à certains éléments, le cuivre est très difficile à séparer de l'acier et contribue à dégrader la résistance du matériau [15]. S. Dworak & J. Fellner (2021) [16] a étudié l'évolution de la production et de la composition des ferrailles au sein de l'Union Européenne entre 1946 et 2017. L'article montre que la qualité moyenne des ferrailles générées en Europe (caractérisée par la concentration en éléments traces comme le cuivre ou l'étain) a diminué ces dernières décennies. En particulier, un surplus de ferrailles de qualité inférieure a été enregistré depuis les années 90, ce qui, comme l'illustre la Figure 24, coïncide fortement avec l'évolution à la hausse des exportations nettes de ferrailles en dehors de l'Union européenne. L'étude suggère ainsi que les ferrailles de moins bonne qualité générées en Europe sont désormais exportées en dehors de l'UE tandis que les ferrailles de bonne qualité sont recyclées au sein de pays de l'UE, le tout vraisemblablement pour des raisons économiques.

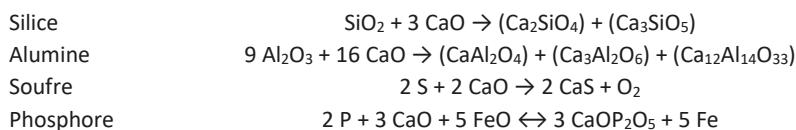


Figure 24 : Estimation du surplus de ferrailles de qualité Q3 et Q4 et exportations nettes de ferrailles de l'Union européenne [16]

2.5. Co-produits : les laitiers sidérurgiques

Les laitiers sidérurgiques sont des sous-produits de la sidérurgie. La maîtrise de la chimie du laitier est essentielle à la production de l'acier, à tel point qu'une vieille expression qui circule dans le monde sidérurgique lui fait honneur : « Make the slag and the steel will make itself » [17].

Les matières premières, principalement le minerai de fer, le charbon et la ferraille, sont toujours sources d'impuretés qu'il est nécessaire de retirer. Parmi celles-ci figurent notamment du soufre, de la silice, du phosphore et différents types d'oxydes comme de l'alumine [17]. Pour former le laitier et éliminer une partie de ces impuretés, de la chaux est ajoutée à différentes étapes du procédé. Ces éléments étant acides, la chaux sert à maintenir la basicité du laitier. Celle-ci réagit avec les éléments selon les réactions suivantes :



Toutefois, du fer peut être perdu dans le laitier sous la forme de FeO, raison pour laquelle la présence d'impuretés a tendance à dégrader le rendement ferrique et donc la productivité [18]. En général, les laitiers sidérurgiques sont valorisés dans le secteur de la construction. Le laitier de haut-fourneau rentre ainsi dans la composition de certains ciments²¹ tandis que le laitier d'aciérie électrique est souvent utilisé en sous-couche routière pour ses propriétés géotechniques. Le laitier issu de la production d'acier inoxydable est plus difficilement valorisable car il contient une teneur élevée en chrome, parfois jusqu'à 30 %. Il existe plusieurs grands types de laitiers sidérurgiques résumés dans le Tableau 2 [19], [20].

²¹ Plus d'informations disponibles dans le rapport « Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France » disponible ici : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5041-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-cimentiere-en-france.html>

Type de laitier	Description	Production unitaire	Composition	Utilisation
Laitier de haut fourneau cristallisé	Obtenu par un refroidissement lent qui transforme le laitier en une roche dure artificielle et chimiquement stable. Il a des caractéristiques physiques et mécaniques comparables à des matériaux naturels.	~250 – 300 kg/t _{fondue}	CaO 40 % SiO ₂ 35 % Al ₂ O ₃ 11 % MgO 8 %	Travaux publics : granulats pour bétons, enrobés bitumineux, ballast. Ce matériau présente une forte résistance mécanique et une conductivité thermique faible ce qui fait des bétons de granulats de laitier cristallisé de biens meilleurs isolants que les bétons classiques.
Laitier de haut fourneau vitrifié	Obtenu par un refroidissement brutal, généralement à l'eau, cela lui confère une structure vitreuse lui permettant de développer des propriétés analogues à celles du ciment. Il est le plus souvent élaboré sous forme de laitier granulé en raison de ses caractéristiques physico-chimiques.	~250 – 300 kg/t _{fondue}	CaO 40 % SiO ₂ 35 % Al ₂ O ₃ 11 % MgO 8 %	Travaux publics : principalement utilisé dans la production de ciment en substitution du clinker, en particulier pour la réalisation de bétons en milieux agressif (milieu alcalin ou maritime). Également utilisé en tant qu'additif sous forme moulue dans le béton en remplacement partiel de ciment et pour la réalisation de grumes hydrauliques pour les routes. Industrie : utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice.
Laitier d'aciérie de conversion	Laitier issu du convertisseur à oxygène, il est d'abord refroidi progressivement à l'air puis violemment par aspersion d'eau.	~100 kg/t _{acier}	CaO 50 % Fe 15 % SiO ₂ 12% MgO 5%	Agriculture : fertilisant mixte, amendement-engrais sur cultures, herbage, soit directement ou en mélange avec des engrais phosphatés et potassiques Travaux publics : matériau de remblai, couches de forme, confortement d'ouvrages hydrauliques, enrobés bitumineux
Laitiers d'élaboration d'acières carbone en filière électrique	Le laitier de four désigne le laitier issu de la fusion des matières premières dans le four à arc électrique. Le laitier de poche (« laitier blanc ») désigne le laitier issu de l'affinage de l'acier dans le four poche par ajout d'éléments d'addition et de désoxydation.	Laitier de four : ~100 kg/t _{acier}		Laitier de four : sous couche routière, sous couche d'assise, remblais, enrobés bitumineux, traitement des eaux de rejet Laitier de poche : agriculture, industrie cimentière
Laitiers d'élaboration de l'acier inoxydable	Du laitier est produit à trois grandes étapes du procédé. Le laitier de four désigne le laitier issu de la fusion des matières premières dans le four à arc électrique. Du ferro-silicium est ajouté pour limiter l'oxydation du chrome, produisant ainsi de la silice qu'il faut éliminer. De la chaux est ainsi chargée pour former un silicate de chaux liquide qui constituera le laitier.	Laitier de four : ~70 kg/t _{acier} Laitier d'AOD : ~90 kg/t _{acier} Laitier de poche : ~10 kg/t _{acier}	CaO 45 - 55 % SiO ₂ 25 - 35 % MgO 2 - 7 %	Travaux publics : réalisation de pistes et de chemins rustiques, matériaux pour remblai et couches de chaussée, sous revêtement superficiel Construction : granulats de béton, liant hydraulique pour la fabrication de briques

Tableau 2: Résumé des principaux laitiers issus de la sidérurgie

3. Comment fabriquer de l'acier ? Passé, présent, futur.

La production d'acier primaire consiste à enrichir le fer en carbone à partir de minerai de fer, qui est naturellement sous forme d'oxydes. Cette opération nécessite une réaction chimique (une réduction), réalisée aujourd'hui en France dans des hauts fourneaux avec du coke (carbone presque pur) comme agent réducteur et à haute température (1 250 °C). Au cours de ce processus, le carbone subit une combustion, d'une part, et capte l'oxygène lié au fer, d'autre part, provoquant l'émission de CO₂.

Pour réduire les émissions de la filière primaire de production d'acier, deux approches se dégagent. La première consiste à faire évoluer les hauts fourneaux, bien que ces améliorations ne permettent pas une décarbonation complète. L'alternative est de remplacer les hauts fourneaux par d'autres procédés de réduction, moins matures, qui n'engendrent pas d'émissions de CO₂.

Il est également possible de développer la filière secondaire de l'acier, qui génère bien moins d'émissions de CO₂. Pour autant, la production d'acier peut difficilement reposer uniquement sur cette filière car les produits réalisés à partir de ferrailles uniquement sont de moindre qualité et les gisements de ferrailles disponibles peuvent limiter la capacité de production. Par ailleurs, bien que cette filière secondaire soit déjà relativement peu émettrice, de fortes réductions d'émissions y sont encore possibles.

3.1. Histoire des procédés de production d'acier

Les plus anciennes traces d'utilisation et de travail du fer remontent à environ 2500 ans av. J.-C en Anatolie (actuelle Turquie). Les techniques de métallurgie comme le bas fourneau et la trempe se développent à partir de cette période. Du fait de sa meilleure dureté et résistance, le fer remplacera progressivement le bronze dans la fabrication d'armes, raison pour laquelle l'âge du fer succédera finalement à l'âge du bronze vers 800 av. J.-C en Europe de l'Ouest. A l'époque, les forgerons travaillaient le métal manuellement à des températures encore relativement faibles. Le haut fourneau est d'abord apparu en Chine environ 1000 ans av. J.-C : l'augmentation du débit d'air chaud permet d'atteindre des températures plus élevées et conduit indirectement à la découverte de la fonte. La distinction entre le fer et l'acier se fera à l'époque de l'Antiquité et le haut fourneau se répandra progressivement en Europe pendant le Moyen-Âge.

Jusqu'au 19ème siècle, l'acier restait coûteux et produit en petites quantités. Il était réservé à de petits objets comme des couteaux et des épées tandis que les grandes structures métalliques étaient fabriquées en fonte ou en fer forgé. En 1856, l'ingénieur anglais Harry Bessemer invente un premier procédé de conversion à l'oxygène qui améliore l'étape d'affinage de la fonte en acier et qui réduira fortement les coûts de production. C'est d'ailleurs en Grande-Bretagne qu'est née l'industrie moderne de l'acier : elle représentait presque 50% de la production mondiale de fonte en 1875 et exportait en majorité à destination des Etats-Unis. A la fin du 19ème siècle, les Etats-Unis étaient devenus premier producteur mondial et l'Allemagne était sur le point de rattraper la Grande-Bretagne. L'industrialisation de la production d'acier permettra, entre autres, le développement rapide du transport ferroviaire, des chantiers navals, des outillages et des machines thermiques. Avec l'exploitation du charbon, l'acier sera finalement à la base de la Révolution Industrielle. Le procédé de four à arc électrique tel qu'encore utilisé aujourd'hui a quant à lui été mis au point par le physicien français Paul Héroult en 1887 (qui sera par ailleurs à l'origine du procédé d'électrolyse de l'aluminium). A ses débuts, le four à arc électrique était toutefois réservé à la production d'acières spéciaux fortement alliés et de ferroalliages comme le vanadium et le ferrochrome.

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'industrie de l'acier se restructure et entre progressivement dans l'ère de la mondialisation : tandis que les sites de production d'acier se situaient historiquement à proximité de bassins miniers et houillers, de nouvelles usines sont construites dans les années 1950 sur des grands terrains plats situés proches de zones portuaires de manière à réceptionner les matières premières et exporter les produits. C'est également à cette époque que le premier convertisseur à oxygène moderne à produire de l'acier a été construit en 1952 dans la ville de Linz, en Autriche tandis que le second convertisseur de ce type a été construit à Donawitz, une autre ville autrichienne. C'est la raison pour laquelle le procédé de convertisseur à oxygène tel qu'employé aujourd'hui a été nommé procédé LD pour « Linz-Donawitz ». Profitant des grandes quantités de ferrailles issues des ruines et des combats, la filière électrique s'est aussi fortement développée après la Seconde Guerre mondiale. Le convertisseur à oxygène et le four à arc électrique ont peu à peu remplacé les voies moins efficaces comme le procédé Thomas ou le procédé Siemens-Martin dont le dernier four en Europe a été fermé en 1993 alors qu'ils assuraient 80% de la production mondiale en 1950 [21].

Plusieurs voies de production d'acier existent dans le monde ; elles suivent le schéma suivant :

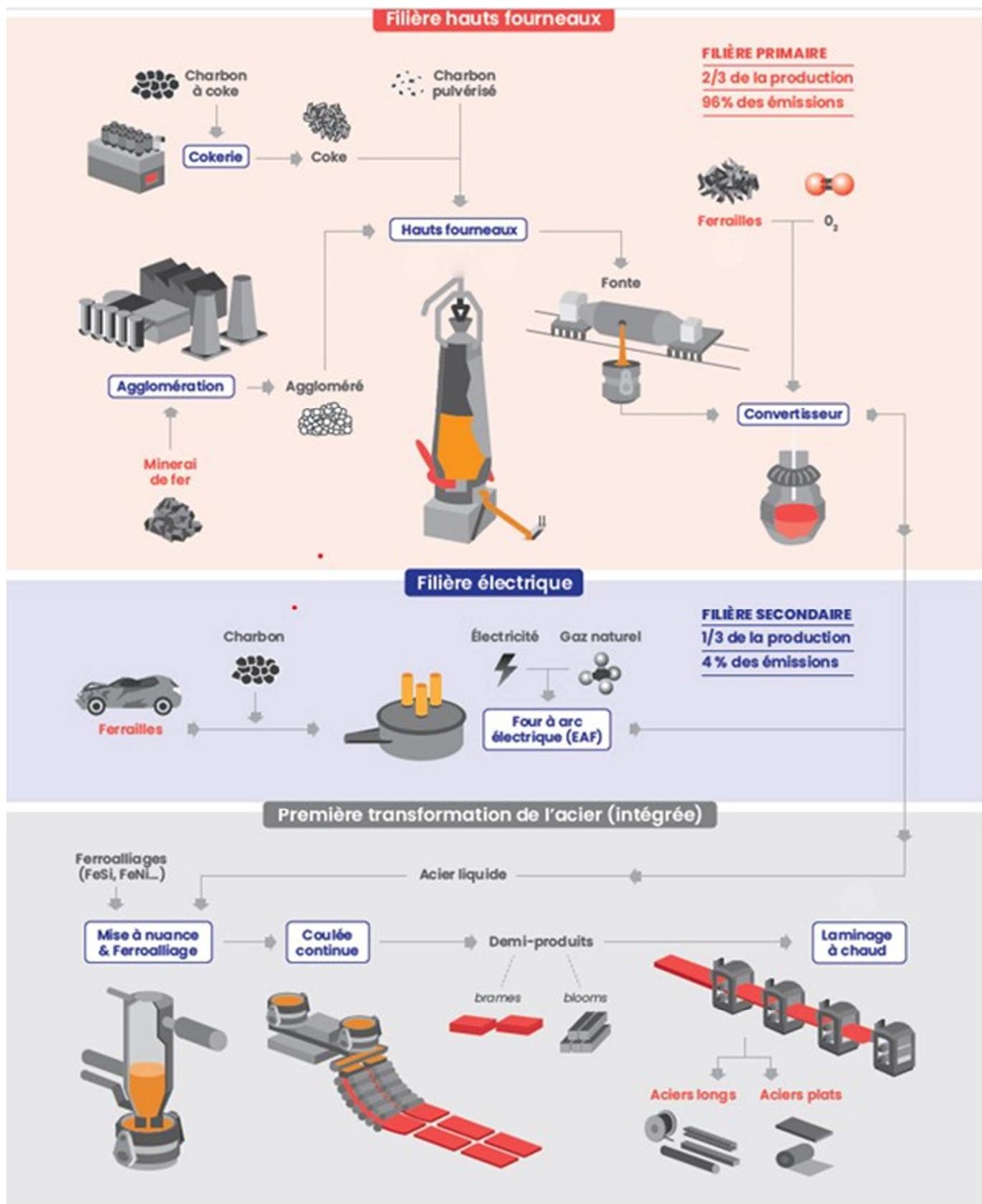


Figure 25 : Principales routes de production d'acier dans le monde (adapté de sources variées par Wang et al. (2020)[22]).

3.2. Filière haut fourneau

3.2.1. Procédés de la filière hauts fourneaux

La filière haut-fourneau produit de l'acier dit « primaire », car issu de l'extraction de minerai de fer²². Le minerai de fer préalablement calibré et préparé est réduit par du charbon à coke dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte liquide à une température de l'ordre de 1 250 °C. Dans une seconde étape, la fonte liquide est transformée en acier dans un convertisseur à oxygène, à l'intérieur duquel de la ferraille peut être incorporée. L'oxygène injecté dans le convertisseur permet de brûler le carbone excédentaire de la fonte pour former l'acier liquide. L'ensemble des outils comprenant l'usine d'agglomération, la cokerie, les hauts fourneaux, les convertisseurs et des lamineurs à chaud puis à froid forment un site intégré. Un haut fourneau peut produire quelques millions de tonnes de fonte par an. La filière haut fourneau représentait au niveau mondial 72 % du parc en 2022 selon World Steel Association, la fédération internationale des producteurs d'acier.

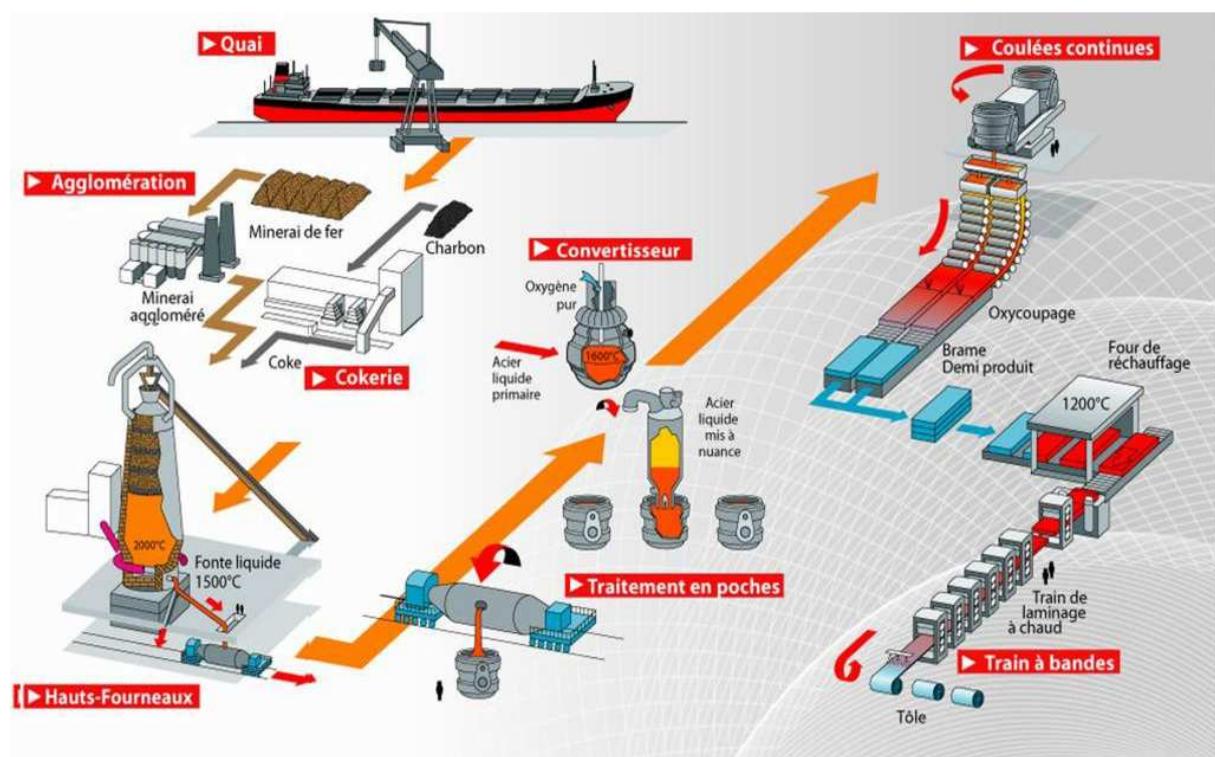


Figure 26: Schéma d'un site intégré de haut fourneau (source : ArcelorMittal [23])

3.2.1.1. Agglomération

Pour être assimilable par le haut fourneau, le minerai de fer doit être transformé en un produit intermédiaire par agglomération. Cette étape a pour fonction de modifier les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des matières premières pour améliorer la qualité de la fonte et augmenter la productivité du haut fourneau. Elle permet notamment de sécher les matières premières, de les déshydrater et d'éliminer les matières volatiles [24].

Il existe deux grandes méthodes : l'agglomération sur grille, qui résulte en un produit simplement qualifié « d'aggloméré » en français (« sinter » en anglais), et l'agglomération en boulettes (« pellets » en anglais). L'agglomération sur grille est le procédé le plus ancien et encore le plus répandu dans le monde, mais l'agglomération en boulettes présente un développement important.

L'agglomération concerne uniquement la fraction fine du minerai de fer, qui est l'une des deux formes de minerai que les sidérurgistes réceptionnent. L'autre forme, qualifiée de « minerai calibré » (« lumps » en anglais), est plus grossière et peut alimenter le haut fourneau après simple concassage et séparation par criblage des fines qu'il contient, qui sont incorporées aux autres fines pour agglomération. L'agglomération sur grille utilise des fines de taille intermédiaire tandis que la pelletisation nécessite des fines de plus petite taille (voir Tableau 3 ci-dessous issu de [25]).

²² Par opposition à la filière secondaire, qui mobilise de la ferraille, i.e. des déchets ferreux.

Du fait de la déplétion des ressources géologiques au niveau mondial, les producteurs de minerai de fer, qui cherchent à répondre à une demande asiatique particulièrement forte, constatent depuis quelques années une baisse de la teneur moyenne en fer et de la qualité des gisements exploités. Ainsi, le minerai calibré à haute teneur en fer a tendance à se raréfier tandis que la production de fines augmente, qui sont plus à même d'être préparées en boulettes plutôt qu'en agglomérés [26].

Produit	Taille	Application
Minerai « calibré »	6,3-31,7 mm	Peut être utilisé directement par un haut fourneau ou un four de réduction directe
Fines pour agglomération sur grille	0,15-6,3 mm	Aggloméré pour utilisation dans un haut fourneau
Fines pour pelletisation	<0,15 mm	Pellets pour utilisation dans un haut fourneau ou un four de réduction direct

Tableau 3: Classification des sous-produits du minerai de fer pour la production d'acier [25].

3.2.1.1.1. Agglomération sur grille

Une fois homogénéisées, les fines sont mélangées avec un combustible solide généralement bon marché, comme la houille ou des rebus de coke (« poussier »), un fondant (produit permettant d'abaisser la température de fusion du minerai, comme la castine, une pierre calcaire), de la chaux ainsi que des sources de fer recyclées dans le procédé comme des retours de fines ou des boues d'aciérie. L'agglomération consiste à réaliser un frittage du mélange par combustion à une température contrôlée sur une grille mobile [21], [27], [28], [29].

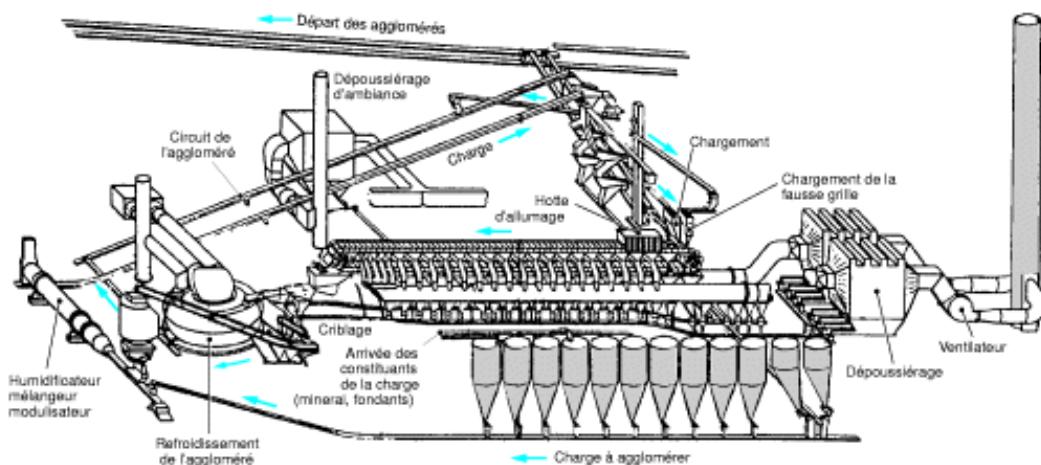


Figure 27: Installation d'agglomération sur une grille de minerais de fer [28].

3.2.1.1.2. Agglomération en boulettes

Tandis que l'agglomération sur grille se fait typiquement sur des sites intégrés, la production de pellets (ou « pelletisation ») est en général réalisée à proximité de la mine qui extrait le minerai de fer. Le premier procédé à être breveté date de 1912 par le suédois A.G. Andersson [25].

Les fines sont d'abord mélangées à un liant hydraulique (typiquement de la bentonite), des fines de charbon et des additifs (tels que de la chaux et de la dolomie pour contrôler la basicité). Les boulettes se forment par agglomération à l'aide d'une quantité précise d'eau et d'une sole de granulation. Les boulettes dites « crues » sont ensuite passées au crible pour retirer la fraction fine qui sera recirculée. Les boulettes de taille et de composition conformes sont séchées et progressivement chauffées jusqu'à environ 1 300 °C afin de réaliser un durcissement par la chaleur (voir Figure 28).

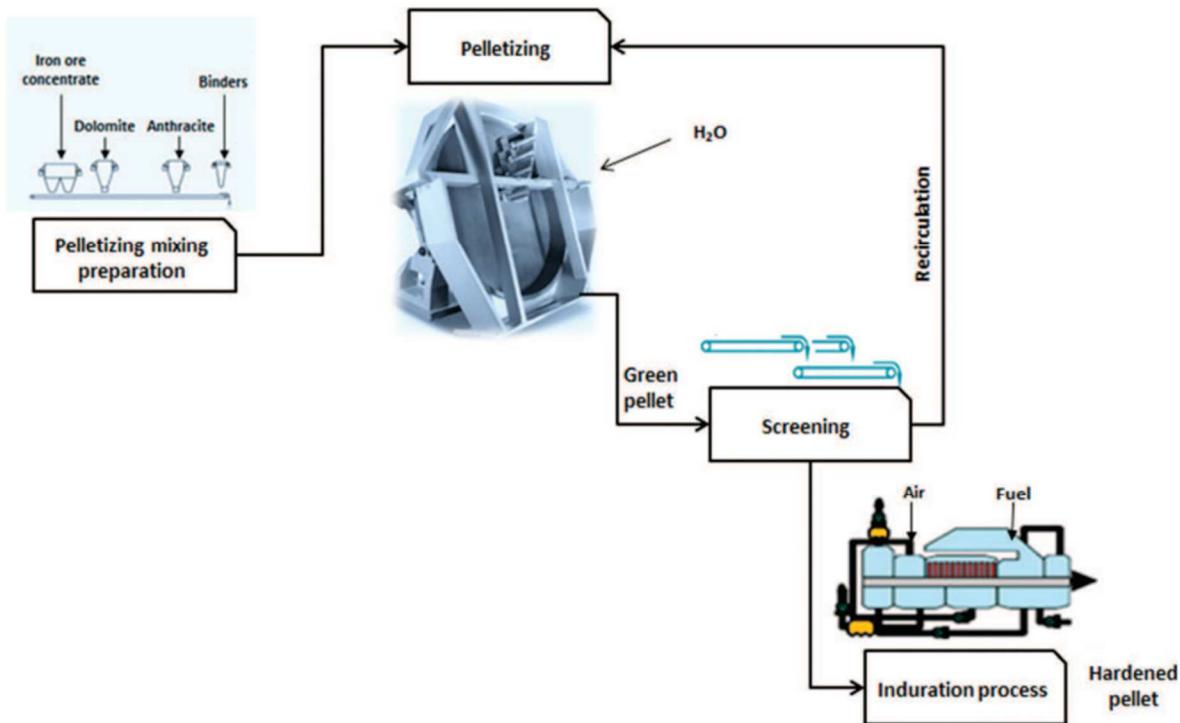


Figure 28: Schéma d'une usine de pellet utilisant un disque de pelletisation [25].

3.2.1.2. Cokerie

En plus de son rôle chimique dans le haut fourneau, le coke a une fonction mécanique : en tant que seul solide permanent dans le réacteur, le coke assure la perméabilité au sein de la charge ce qui signifie qu'il doit laisser circuler les gaz et les liquides tout en assurant une bonne résistance mécanique [30].

Le coke, qui est en fait la principale source de carbone dans le haut fourneau, est produit à partir de charbon à coke. Celui-ci présente une pureté et un contenu en carbone plus élevés que le charbon thermique. À une température élevée aux alentours de 1 100 °C et dans un environnement pauvre en oxygène, le charbon subit une pyrolyse, ce qui a pour effet d'expulser tous les éléments volatils qu'il contient afin de ne conserver que le carbone. La pyrolyse du charbon se fait dans des batteries de fours et peut durer de l'ordre de 16 à 20 heures, raison pour laquelle la production de coke se fait par « batch ». Une fois sorti du four, le coke est refroidi puis criblé pour séparer les plus petites particules qui seront utilisées ailleurs comme combustible (« poussier de coke »). Plusieurs équipements permettent de traiter l'eau et les gaz en sortie des fours afin d'éliminer les goudrons, le soufre, l'ammoniac et autres hydrocarbures. Le procédé génère également du gaz de cokerie, qui est de même nature que le gaz de houille qui était autrefois utilisé pour l'éclairage dans les villes. Composé en majorité d'hydrogène (~60 %), de méthane (~25 %), d'azote et de monoxyde de carbone (CO), il est en général valorisé énergétiquement après nettoyage pour directement couvrir les besoins thermiques de la cokerie ou pour la production électrique dans certains cas [1], [21], [27], [31]²³. La part importante d'H₂ dans les gaz de cokerie s'explique par le procédé de pyrolyse du charbon qui élimine les éléments volatils et produit des composés légers dont de l'hydrogène de manière à laisser un solide carboné : le coke [32].

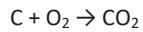
3.2.1.3. Haut fourneau

Le haut fourneau (Figure 29 et Figure 30) est un réacteur chimique à contre-courant dans lequel les oxydes de fer sont réduits. Le coke et le minerai de fer sont enfournés par le haut du réacteur, le « gueulard ». Du charbon pulvérisé (séché et finement broyé) est également injecté au niveau des tuyères, en contrebas [33]. Ce dernier se substitue à une partie du coke, qui est plus coûteux. Le charbon utilisé pour injection en tuyère est typiquement du charbon thermique de haute qualité ou du charbon métallurgique non utilisable pour la cokéfaction, qui sont moins chers que le coke. La réaction globale produit de la fonte liquide contenant environ 4-5 % de carbone et un laitier qui surnage le métal en fusion. Les deux produits sont récupérés séparément à la base du haut fourneau, au niveau du « creuset », sous les tuyères d'injection d'air chaud.

²³ La composition du gaz de cokerie en fait une ressource valorisable énergétiquement, mais également chimiquement, à travers le pouvoir réducteur du dihydrogène (H₂) et du monoxyde de carbone (CO). C'est l'objet de l'injection de gaz de cokerie comme agents réducteurs dans les hauts fourneaux.

Le vent est préchauffé par des cowpers avant le soufflage dans le haut fourneau. Il s'agit d'une installation de chauffage au fonctionnement cyclique : de l'air froid préalablement suroxygéné est chauffé entre 1 200 et 1 250 °C au moyen d'un brûleur alimenté principalement par du gaz de haut fourneau, en tant qu'énergie la moins chère de toutes, et éventuellement enrichi en gaz de cokerie (fonctionnement « au gaz ») puis le vent chaud est soufflé dans le haut fourneau (fonctionnement « au vent ») [21], [34], [35].

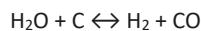
La première réaction chimique qui se produit est une réaction de combustion du coke par l'oxygène présent dans l'air chaud. Cette réaction exothermique (i.e. qui libère de la chaleur), qui a lieu dans le creuset, constitue le principal apport thermique du haut fourneau. La température atteinte par le gaz au niveau des tuyères, dite « température de flamme », se situe généralement entre 1 900 et 2 100 °C [27].



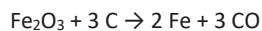
À température élevée, il s'ensuit immédiatement une réaction endothermique (i.e. qui consomme de l'énergie) entre le CO₂ produit par la réaction précédente, et le carbone solide. Cette réaction chimique est équilibrée, il s'agit d'un équilibre de Boudouard. Elle assure la régénération du monoxyde carbone à mesure qu'il est consommé par la réduction des oxydes.



Du dihydrogène (H₂), un second gaz réducteur, est également produit par décomposition thermique de la vapeur d'eau présente dans l'air injecté au niveau des tuyères. Ce gaz est aussi produit à partir d'hydrogène contenu dans le charbon d'injection dont la teneur est plus élevée que dans le coke et par l'humidité de la charge entrante. Par exemple, dans la marche du haut fourneau 1 d'ArcelorMittal Fos en 2015 avec une forte injection de charbon, le gaz H₂ était produit à 62 % par l'hydrogène provenant du charbon d'injection et à 25 % de l'humidité de la charge [27], [36]. En présence d'eau, l'équation générale de production d'H₂ s'écrit :



Dans le minerai, le fer se trouve principalement présent sous trois formes d'oxydes : l'hématite (Fe₂O₃), la magnétite (Fe₃O₄) et la wustite (FeO), ici présentés de la forme la plus oxydée à la moins oxydée. Dans la chaîne de réaction, l'hématite Fe₂O₃ (+III) est d'abord réduite en magnétite Fe₃O₄ (+II, +III) puis en wustite FeO (+II) et enfin en fer Fe. En sortie de tuyère, le gaz réducteur est composé à environ 35 % de CO, 5 % de H₂ et le reste est composé d'azote. Celui-ci remonte dans le haut fourneau à contre-courant de la matière solide et participe à la réduction dite « indirecte » des oxydes de fer Fe₂O₃ et Fe₃O₄, qui sont réduits en FeO dans la partie supérieure de la cuve. Au sein d'un haut fourneau, 70 à 80 % de la réduction des oxydes vient du CO et 20 à 30 % vient de l'H₂ [37]. Dans la partie inférieure de la cuve, au niveau du « ventre », la wustite FeO est réduite en Fe au-delà de 1 000 °C indirectement par les gaz réducteurs et directement par le carbone contenu dans le coke et le charbon d'injection. La réaction globale de réduction des oxydes de fer s'écrit [27] :



Une partie du coke se dissout dans le métal en fusion et produit ainsi de la fonte par carburation. D'autres éléments présents sous la forme d'oxydes dans la charge sont également réduits lors de leur passage dans le haut fourneau et se retrouvent partagés dans la fonte et le laitier. Parmi ces éléments figurent du manganèse, du silicium, du phosphore, de l'aluminium, du magnésium, du calcium, du titane, du vanadium, du chrome, du cuivre, du nickel, du cobalt, du zinc, du plomb, du sodium, du potassium et du soufre [27].

Le rôle de la chaux (et du calcaire décarbonaté en chaux selon la réaction CaCO₃ → CaO + CO₂) est de retirer le soufre et les impuretés acides dans la charge par la formation d'un laitier [38].

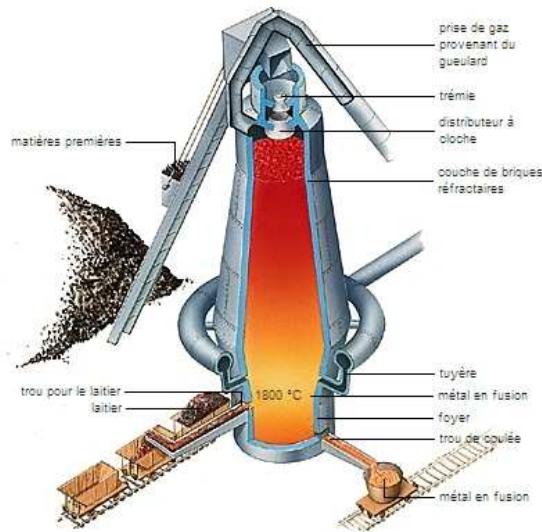


Figure 29: Coupe d'un haut fourneau [39]

Le Haut Fourneau

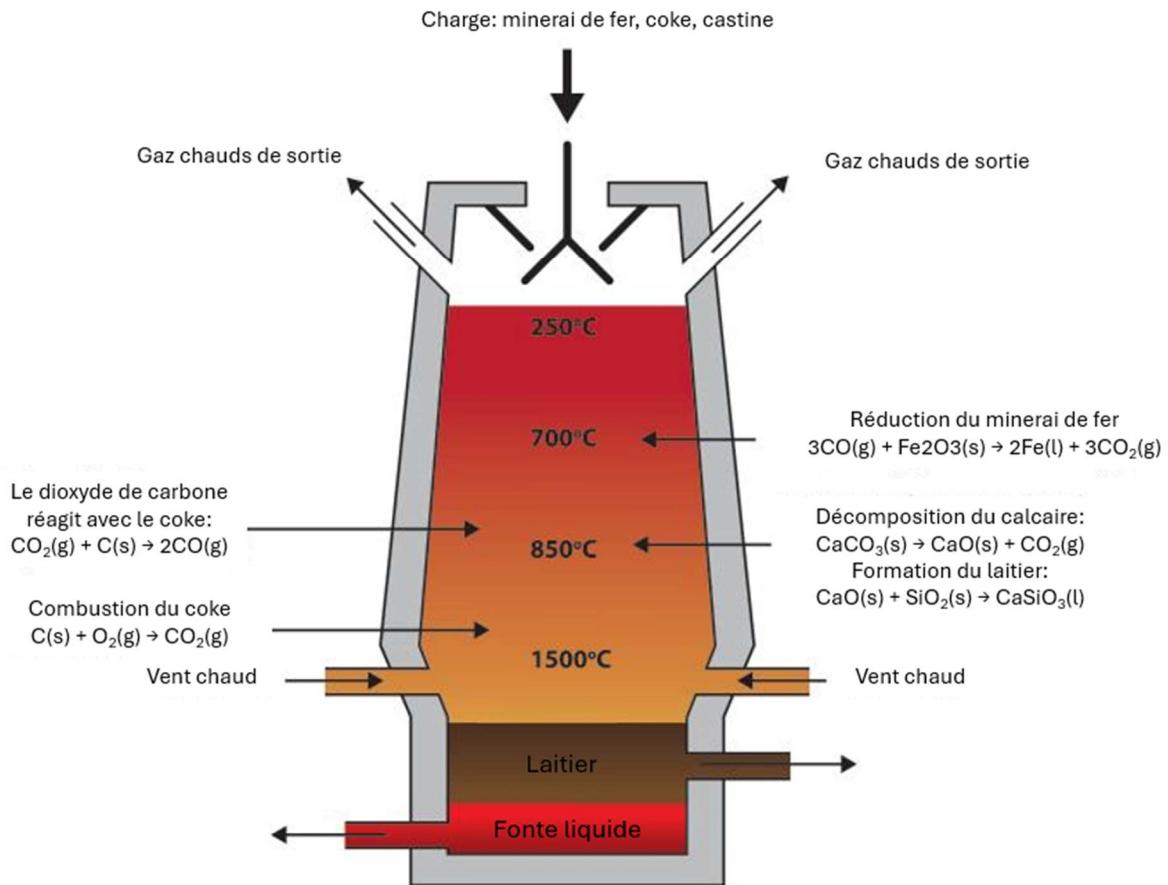


Figure 30: Schéma en coupe d'un haut fourneau [40].

3.2.1.4. Aciérie de conversion

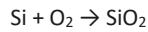
Un convertisseur à oxygène est un réacteur qui permet de produire de l'acier à partir de fonte en réduisant sa teneur en carbone par soufflage d'oxygène pur (> 99 %) [21], contrairement à l'oxygène utilisé pour enrichir le vent du haut fourneau qui ne nécessite une pureté que de 95 % minimum [31]. Le degré d'oxydation de la fonte dépend de la qualité d'acier voulue. La réaction globale, qui n'est qu'une oxydation de plusieurs éléments, est exothermique, ce qui permet de maintenir un apport de chaleur dans le métal liquide, mais la température doit être régulée. Ce contrôle de la température est notamment

réalisé par l'ajout de ferrailles qui permettent également de réduire la quantité de fonte nécessaire à la production d'une tonne d'acier [31].

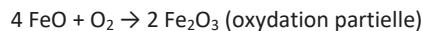
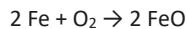
En sortie du haut fourneau, la fonte liquide est acheminée vers l'aciérie par des poches tonneaux ou « torpilles ». La fonte est ensuite désulfurée par injection d'un agent désulfurant, généralement du carbure de calcium (CaC_2) mais parfois aussi de la chaux ou du magnésium [21]. En présence de carbure de calcium, le soufre présent dans la fonte se retrouve alors dans le laitier sous forme de sulfure de calcium (CaS). La fonte est ensuite versée dans une poche d'enfournement et si l'opération de désulfuration ne s'est pas faite avant, elle se fait habituellement à cette étape. Dans la poche d'enfournement, le laitier riche en soufre est retiré par décrassage : la manœuvre consiste à gratter le laitier à la surface du liquide dans une cuve de récupération à l'aide d'un rabot. Une fois le laitier éliminé, la fonte est versée dans le convertisseur par basculement de la poche d'enfournement. Les ferrailles sont de plus en plus fréquemment enfournées avant le versement de la fonte liquide, ceci afin d'éviter des bouffées de flammes poussiéreuses. La ferraille peut provenir de recyclages internes ou « riblons » (bobines, fonte solide, coils ...) ou d'un recycleur externe. D'autres sources en fer comme de la fonte solide, du DRI (mineraux de fer pré-réduits) ou du mineraux de fer peuvent être ajoutées. De la chaux (CaO) et de la magnésie (MgO) sont également introduites dans le convertisseur dont le but est d'aider à la formation du laitier. Dans un convertisseur « à lance », l'oxygène est injecté par le haut du réacteur à travers une lance. Des tuyères d'injections peuvent également être présentes dans le fond du convertisseur. Elles permettent le brassage de la fonte par l'injection d'oxygène (à plus faible débit que la lance) et de gaz inertes tels que le diazote N_2 ou l'argon Ar en fin de soufflage. L'opération produit de l'acier dit « sauvage » qui est séparé du laitier par un mouvement de basculement alterné du convertisseur. L'acier sauvage est transvasé dans une poche à acier dans lequel il sera affiné par différents traitements en poche : c'est la métallurgie secondaire qui sera détaillée dans la partie suivante [41], [42].

Plusieurs réactions ont lieu dans le convertisseur du fait de la présence de différents éléments dans la fonte. Cette dernière contient principalement du fer mais aussi du carbone (4,4 à 4,8 %), de la silice (0,36 à 0,63 %), du manganèse (0,22 à 1,04 %), du phosphore (0,04 à 0,09 %), du soufre (0,004 à 0,06 %) et de l'aluminium. En Europe, les hauts-fourneaux produisent de la fonte à basse teneur en phosphore (moins de 0,15 %), appelée « fonte hématite » [41].

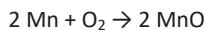
L'oxydation du silicium (ou désiliconisation) est l'une des premières réactions à avoir lieu. La silice (SiO_2) ainsi obtenue réagit avec la chaux qui pour formera ensuite le laitier. De même, de l'aluminium peut être oxydé en alumine.



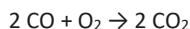
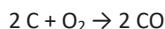
Le fer de la fonte subit également une oxydation dès le début du soufflage suivant les réactions suivantes. Les oxydes forment un des constituants des poussières mais la majeure partie se retrouve dans le laitier. Ce processus tend donc à diminuer le rendement ferrique dans la mesure où le fer oxydé est « perdu ».



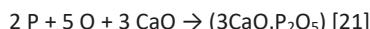
Le manganèse se comporte comme le fer et son oxyde se dissout dans le laitier.



Le carbone contenu dans la fonte est oxydé en monoxyde de carbone qui sera à son tour partiellement oxydé en dioxyde de carbone : c'est la réaction de décarburation. En-dessous d'une teneur en carbone de 0,02 % à 0,04 % dans l'acier, la perte en fer dans le laitier et la teneur en oxygène dans l'acier deviennent trop importantes et l'injection est stoppée [41], [42].



Le phosphore est également retiré dans le laitier à travers une réaction de déphosphoration.



Enfin, du soufre est évacué par le laitier, les fumées et l'acier. Le convertisseur n'étant pas capable de produire des aciers à très basse teneur en soufre, il est devenu courant de désulfurer la fonte et l'acier en poche [41], [42].

3.2.1.5. Métallurgie secondaire

Une fois l'acier liquide transvasé en poche acier, il pourra être soumis à différents traitements selon la qualité d'acier désirée. La métallurgie secondaire permet de répondre à des exigences de plus en plus sévères concernant la composition chimique et les propriétés des aciers. En sortie de convertisseur, l'acier sauvage est suroxydé et doit donc subir une désoxydation.

Quel que soit le procédé utilisé pour obtenir l'acier liquide brut, celui-ci est ensuite affiné dans d'autres fours spéciaux pour ajuster la teneur en éléments d'alliage puis coulé dans des machines de coulée continue où il est solidifié et formé en semi-produits. 95% de la production mondiale est coulée sous forme de billettes, blooms et brames tandis que les 5 % restant sont dédiés à la coulée en lingots qui nécessitent une transformation supplémentaire en semi-produits.

Dans le procédé RH (pour « Ruhrstahl-Heraeus ») ou sa version avec soufflage d'oxygène RHOB (pour « Oxygen Blowing »), procédé par circulation le plus utilisé, l'acier subit un dégazage et une décarburation. La poche contenant l'acier liquide est recouverte d'une chambre dans laquelle le vide est fait grâce à une aspiration de l'air (voir Figure 31). L'acier liquide circule dans la chambre à travers des « snorkel » (traduit par tuba en français), le tout grâce à l'injection d'argon. Les gaz dissous dans l'acier s'échappent sous l'effet de la très faible pression qui règne dans la chambre. Le but initial des traitements sous vide était le dégazage de l'acier en particulier, l'élimination de l'hydrogène, de l'azote et de l'oxygène dissous. Ces traitements permettent également de retirer du carbone résiduel (décarburation) par injection d'oxygène, produisant ainsi des alliages à très faible teneur en carbone (inférieure à 0,002 %).

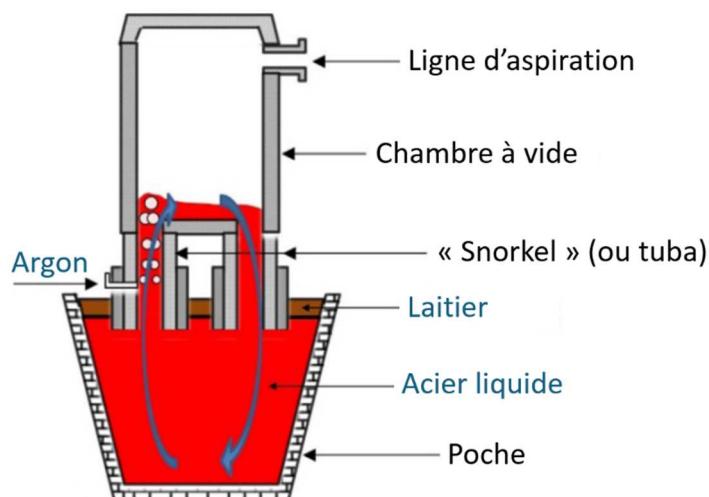


Figure 31: Schéma du procédé Ruhrstahl-Heraeus [43].

Afin d'abaisser la teneur en oxygène et éliminer des inclusions dans le métal, il est nécessaire de rajouter des éléments désoxydants dont les plus courants sont le silicium, le manganèse et l'aluminium. La réaction d'oxygène avec ces désoxydants dégage de l'énergie sous forme de chaleur, en particulier l'aluminium. En présence de ces éléments, l'acier est dit « calmé ». Ces additions sont faites à vide, sur le métal à nu pour éviter des pertes par oxydation.

La mise à nuance fine de l'acier est réalisée par le procédé CAS (pour « Composition Adjustment by Sealed argon-bubbling ») ou une variante, le procédé CAS-OB (pour « Oxygen Blowing », voir Figure 32). Dans ces deux procédés, il y a addition de ferroalliages (FeNi, FeMo, FeMn, FeCr, etc.) et le métal liquide est brassé par injection d'un gaz neutre comme de l'argon. Dans cette configuration, une cuve renversée est plongée dans le métal de façon à le séparer du laitier et à le maintenir dans une atmosphère neutre ce qui permet d'éviter l'oxydation des ferroalliages, la réoxydation de l'acier et donc d'obtenir de très bons rendements d'ajout. Le procédé CAS-OB comporte en plus un chauffage par aluminothermie. C'est une technique de chauffage thermochimique qui consiste à ajouter de l'aluminium pour provoquer une réaction d'oxydation exothermique avec de l'oxygène soufflé à travers une lance [21], [44], [45].

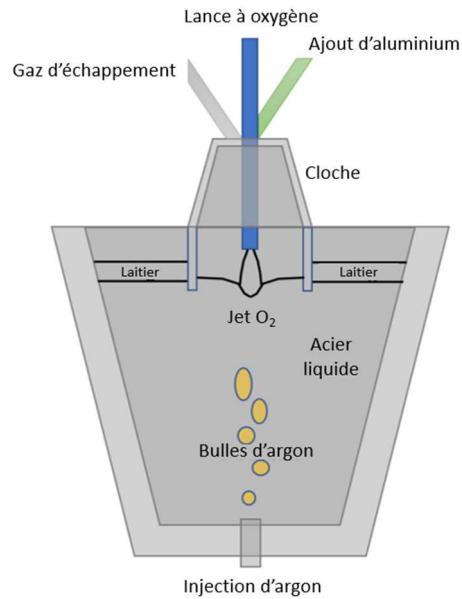


Figure 32: Schéma du procédé CAS-OB [46].

3.2.1.6. Gaz sidérurgiques

Les gaz sidérurgiques désignent les trois grands types de gaz qui sont co-produits sur un site intégré. Il s'agit du gaz de cokerie (abrégé « COG » pour « Coke Oven Gas » en anglais), du gaz de haut fourneau (abrégé « BFG » pour « Blast Furnace Gas » en anglais) et du gaz de convertisseur, ou gaz d'aciérie (abrégé « BOFG » pour « Basic Oxygen Furnace Gas » en anglais). Du fait de l'utilisation incomplète (ex : cas du CO au convertisseur) et de la production de certaines molécules lors du procédé (ex : cas de l'H₂ à la cokerie), les gaz sidérurgiques contiennent des composés non inertes en proportions variables qui leur confèrent un pouvoir calorifique (quantifié par le « PCI » pour « Pouvoir Calorifique Inférieur »). Le Tableau 4 présente la composition de ces trois gaz selon plusieurs sources bibliographiques. Ces gaz peuvent ainsi être valorisés dans des postes consommateurs d'énergie au sein de l'usine tels que le laminage ou dans une centrale de cogénération. C'est par ailleurs une des raisons pour laquelle une usine de haut fourneau est qualifiée de « site intégré ».

En pratique, le gaz de cokerie est le plus énergétique des trois du fait de son contenu élevé en H₂ et CH₄. A l'inverse, le gaz de haut fourneau est le plus pauvre énergétiquement car le carbone contenu dans la charge entrante a été utilisé pour réduire les oxydes métalliques (rôle du haut fourneau) et converti en CO₂. La présence d'azote (N₂) en tant que gaz inerte apporté lors du soufflage du vent chaud contribue aussi largement à diluer les autres composés. Toutefois, malgré son faible pouvoir calorifique, la quantité totale d'énergie fournie par les gaz de haut fourneau est bien supérieure à celle des autres gaz (presque deux fois plus que le gaz de cokerie). Ceci est dû au fait que, à production d'acier donnée, la production volumique de gaz de haut fourneau est plus importante que celle des autres gaz. Enfin, le gaz de convertisseur présente quant à lui un contenu énergétique intermédiaire entre le gaz de haut fourneau et le gaz de cokerie du fait notamment de la présence de CO.

Gaz sidérurgique	Source	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%N ₂	% autres	PCI
Gaz de cokerie (COG)	H. Wang et al. (2016) [47]	6,7 %	2,2 %	26,6 %	60,7 %	0 %	4,0 %	0 %	-
	B. Bieda et al. (2015) [48]	6,6 %	2,6 %	23,7 %	57,3 %	0 %	7,2 %	2,4 %	17,17 MJ/m ³
	Moyenne BREF (2013) [21]	4,6 %	3,2 %	21,4 %	48,9 %	0 %	3,3 %	1,9 %	14 MJ/Nm ³
	S. Garcia et al. (2020) [49]	5,4 %	1,4 %	24,4 %	58,1 %	2,2 %	5,6 %	1,2 %	16,70 MJ/Nm ³
	P. Hellberg et al. (2005) [50]	6,3 %	1,3 %	24,1 %	62,9 %	0,5 %	3,9 %	0 %	-
	A.M. Iosif (2006) données SP9 [51]	4,9 %	1,5 %	24,7 %	62,9 %	0 %	2,0 %	4 %	20, 59 MJ/Nm ³
Gaz de haut fourneau (BFG)	H. Wang et al. (2016) [47]	19,9 %	23,4 %	0 %	3,3 %	1,7 %	51,7 %	0 %	-
	Moyenne BREF (2013) [21]	23 %	21 %	0 %	4,5 %	0 %	51 %	0 %	3,3 MJ/Nm ³
	K. Afanga (2014) valeurs expérimentales [24]	21,8 %	22,5 %	0 %	4,4 %	0 %	51,3 %	0 %	-
	A.M. Iosif (2006) données SP9 [51]	23,1 %	23,8 %	0 %	4,4 %	0 %	48,7 %	0 %	3,4 MJ/Nm ³
Gaz de convertisseur (BOFG)	BREF (2013) [21]	72,5 %	16,2 %	0 %	3,3 %	0 %	8 %	0 %	9,58 MJ/Nm ³
	S. Garcia et al. (2020) [49]	68,2 %	13,4 %	0 %	1,1 %	3,4 %	13,0 %	0,6 %	8,79 MJ/Nm ³
	P. Hellberg et al. (2005) [50]	55,3 %	14,7 %	0,6 %	1,0 %	0,5 %	27,9 %	0 %	-
	A.M. Iosif (2006) [51]	87,3 %	9,9 %	0 %	0,8 %	1,9 %	0,1 %	0 %	9,24 MJ/Nm ³

Tableau 4: Composition des gaz de cokerie en pourcentage volumique selon différentes sources.

Lorsque les gaz sidérurgiques ne sont pas valorisés, ils sont envoyés aux torchères. Celles-ci sont des équipements de sécurité permettant d'assurer l'équilibre interne du réseau de gaz. Le torchage est employé lorsque les gazomètres ne suffisent plus à stocker le surplus, pour réguler la pression du réseau et pour sécuriser le réseau en cas de fonctionnement anormal. Dans la mesure où il s'agit d'un manque à gagner pour l'usine, les sites intégrés réalisent une optimisation en temps réel des flux de gaz pour réduire au maximum le taux de torche. Il n'est toutefois pas possible en pratique de supprimer totalement le torchage, ne serait-ce parce que certaines productions de gaz et certains postes de consommation sont instables et non synchronisés. En effet, alors que le gaz de cokerie et le gaz de haut fourneau sont issus de process relativement stables et continus, le gaz d'aciérie est produit sur un process par batch très variable (d'où un taux de torche plus important). De même, la consommation des cowpers (produisant le vent chaud pour les hauts fourneaux) est stable tandis que la demande énergétique du laminoir est variable.

3.2.2. Modélisation de la filière hauts fourneaux

Dans la modélisation, les sites intégrés de hauts fourneaux sont représentés par une seule usine de référence (REF1) qui comprend la cokerie, l'agglomération, les hauts fourneaux eux-mêmes, l'aciérie (qui inclut notamment le convertisseur à oxygène et la métallurgie secondaire), la coulée continue, le laminage à chaud ainsi que la centrale thermoélectrique qui valorise les gaz sidérurgiques en électricité et en chaleur pour les besoins de l'usine. En somme, tout se passe comme si l'ensemble de la production française issue de la filière fonte (venant en pratique des sites d'ArcelorMittal Dunkerque, ArcelorMittal Fos-sur-Mer et Saint-Gobain PAM) était assurée par une seule usine qui présente des consommations énergétiques et des émissions spécifiques moyennes à l'échelle nationale.

La Figure 33 présente un schéma de procédé de cette usine de référence. La construction de l'usine de référence REF1 s'est faite sur la base de l'étude de source de données confidentielles sur les sites français ainsi que de plusieurs sources bibliographiques qui modélisent un site intégré. Les sources en question dont sont issues plusieurs hypothèses numériques sont J. Song et al. (2019) [52], H. He et al. (2017) [53], A. Keys et al. (2019) [31] et D. Isler (2016) [32]. Bien qu'aucune valeur qui y figure n'ait été retenue comme hypothèse de modélisation de l'usine REF1, quatre autres sources ont également été étudiées à savoir K. Afanga (2014) [24], E. Ubieto Udina (2012) [54], M. McBrien et al. (2016) [55] et P. Jin et al. (2017) [56], permettant de conforter les ordres de grandeur. Les hypothèses de modélisation de l'usine de référence ont été choisies de façon à se rapprocher au mieux du fonctionnement des usines françaises existantes sans toutefois trahir des informations confidentielles à leur sujet. Comme le montre la Figure 33Figure 33, un site intégré de hauts fourneaux a un fonctionnement très complexe, notamment du fait de la production et de la consommation de gaz sidérurgiques. Pour chaque valeur de production ou de consommation spécifique est indiqué entre parenthèse l'origine de la source. La grande majorité des valeurs présentées sont des hypothèses ADEME formulées sur la base de l'analyse de données confidentielles. Aucun de ces chiffres ne correspond à des valeurs réelles de sites existants.

En plus des procédés directement liés à la production d'acier (agglomération, hauts fourneaux, laminage, etc.), l'usine de référence inclut des torchères ainsi qu'une centrale thermoélectrique produisant de la vapeur et de l'électricité. Dans la modélisation, le taux de torche de chacun des trois gaz sidérurgiques a été fixé avant de calculer l'énergie restante disponible pour valorisation à la centrale thermoélectrique. Cette dernière convertit l'énergie contenue dans les gaz sidérurgiques en énergie utile avec une hypothèse de rendement de 36 %, laquelle énergie utile est ensuite distribuée entre la production de

vapeur et la production d'électricité. A noter toutefois qu'avant d'être valorisés à la centrale thermoélectrique, les gaz sidérurgiques sont consommés directement en combustion pour les besoins en chaleur de certains postes de consommation (agglomération, cokerie, etc.). La clef de répartition entre production de vapeur et d'électricité a été choisie de façon à couvrir prioritairement la totalité des besoins en vapeur de l'usine (lavage du gaz à la cokerie, pompes à vide pour le procédé Ruhrstahl-Heraeus à l'aciérie, etc.), le reste étant valorisé en production électrique. Il est également supposé que la totalité de la production d'électricité de la centrale est consommée en interne ce qui permet de couvrir presque 45 % des besoins de l'usine modélisée. Une connexion au réseau national permet de répondre au besoin restant en électricité (soit environ 65 %). L'oxygène consommé aux hauts fourneaux et au convertisseur est produit sur site grâce à un séparateur d'air (ou ASU pour « Air Separation Unit » en anglais). Celui-ci produit également de l'azote qui est utilisé à l'aciérie comme gaz inerte pour le brassage du métal. Des ferroalliages sont également consommés au niveau de l'aciérie. Sur la base de IEAGHG (2013) [57], il a été supposé que la production de bobines à chaud nécessitait du FeMnC (ferromanganèse carburé) à hauteur d'environ 12 kg/t_{acier liquide} et du FeSi-75 (ferrosilicium à 75%) à hauteur d'environ 3 kg/t_{acier liquide}. Il a également été supposé que l'aciérie consomme de l'aluminium sous forme de fil pour désoxydation à hauteur d'environ 2 kg/t_{acier liquide}.

La composition des gaz sidérurgiques a également été modélisée. Celle-ci est notamment nécessaire par la suite pour la modélisation de la technologie de recirculation des gaz sidérurgiques. Une fois la composition volumique définie, le Pouvoir Calorique Inférieur (PCI) moyen de chaque gaz a été calculé sur la base du contenu énergétique volumique de chacun de ses composés. Le Tableau 5 détaille la composition des gaz sidérurgiques. De plus, le facteur d'émission (en kgCO₂/Nm³) a été calculé sur la base du contenu carbone de chacun des gaz en supposant une combustion complète et que les seuls composés qui contribuent à générer du CO₂ sont le CO₂, le CO et le CH₄. De cette façon, les caractéristiques physico-chimiques des gaz sidérurgiques (PCI et facteur d'émission) pourront être réévalués en cas de changement de composition. Le gaz de cokerie est abrégé COG (pour « Coke Oven Gas » en anglais), le gaz de haut fourneau est abrégé BFG (pour « Blast Furnace Gas » en anglais) et le gaz de convertisseur, ou gaz d'aciérie, est abrégé BOFG (pour « Basic Oxygen Furnace Gas » en anglais).

Composé	PCI (MJ/Nm ³)	Contenu carbone (kgC/Nm ³)	COG (%vol)	BFG (%vol)	BOFG (%vol)
H ₂	12,8	0	60,7 %	4,5 %	1,1 %
CO	12,7	0,49	6,7 %	23 %	68,2 %
CO ₂	0	0,51	2,2 %	21 %	13,4 %
CH ₄	35,9	0,49	26,6 %	0 %	0 %
N ₂	0	0	4,0 %	51 %	13,0 %
H ₂ O	0	0	0 %	0 %	3,4 %
Autres	0	0	0 %	0 %	0,6 %
Source bibliographique	Divers	Divers	H. Wang et al. (2016) [47]	Moyenne BREF (2013) [21]	S. Garcia et al. (2020) [49]
PCI moyen (MJ/Nm ³)	-	-	18,13	3,49	8,77
Facteur d'émission (kgCO ₂ /Nm ³)	-	-	0,64	0,81	1,47
Facteur d'émission (kgCO ₂ /GJ)	-	-	35,4	231,0	167,9

Tableau 5: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Caractéristiques des gaz sidérurgiques.

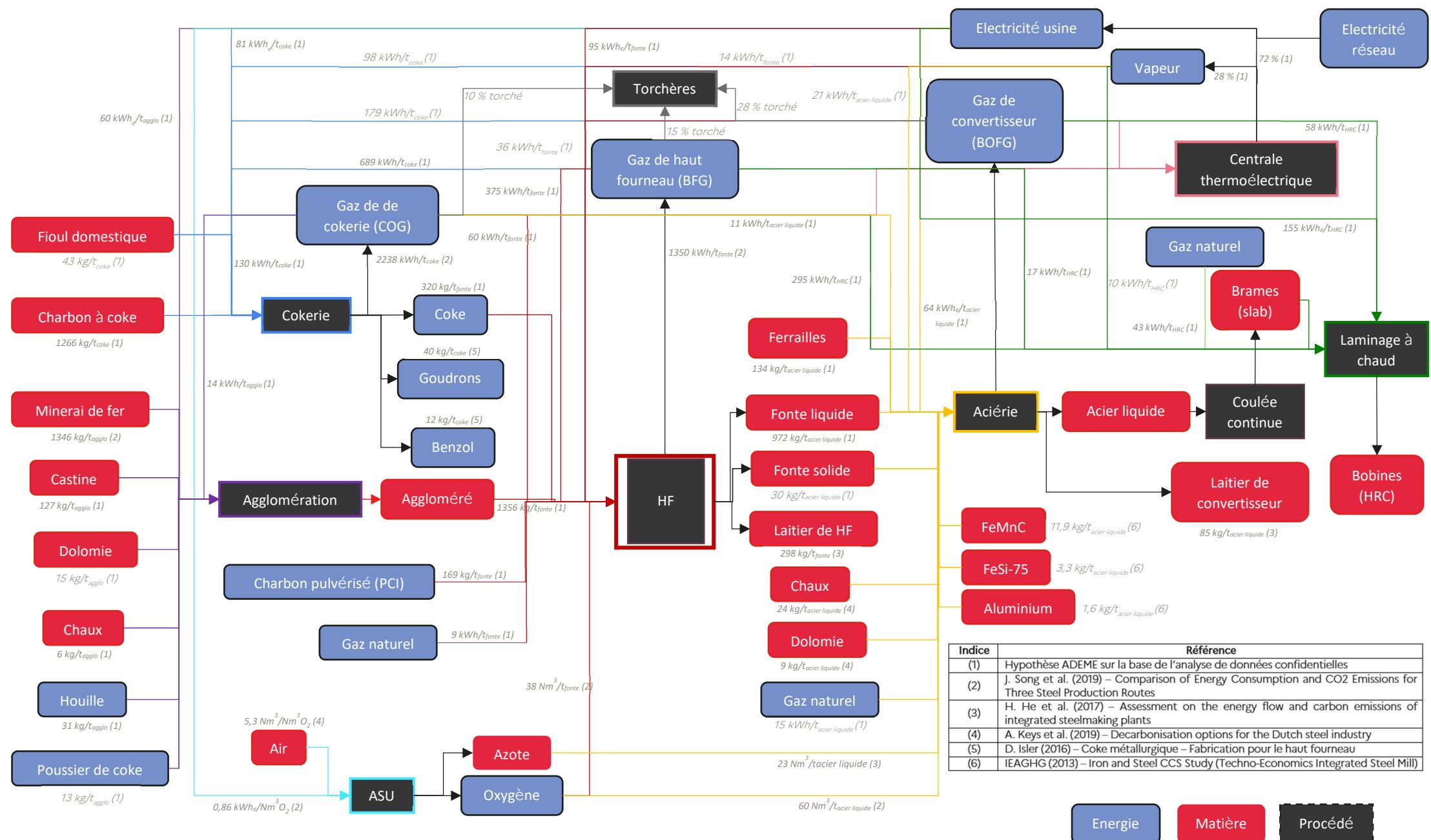


Figure 33: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Schéma de procédé.

La construction de l'usine de référence REF1 s'est faite également au regard des émissions de GES qu'elle génère de manière à se rapprocher au plus possible des émissions réelles totales en 2015 au périmètre des hauts fourneaux. La Figure 34Figure 34 permet de visualiser les émissions reconstituées de l'usine de référence REF1 en utilisant un bilan carbone entrée-sortie sur chacun des différents postes. Avec une marge d'erreur inférieure à 0,5 %, le total de ces émissions est très proche des émissions réelles en 2015 au périmètre hauts fourneaux. A cet égard, la représentation de l'usine de référence REF1 peut être considérée comme très satisfaisante. Même si les procédés sidérurgiques sont à l'origine de la production de gaz contenant du carbone, 40 à 45 % des émissions de CO₂ ont physiquement lieu au niveau de la centrale thermoélectrique et des torchères qui consomment les gaz sidérurgiques, c'est dire à quel point ces gaz représentent un poids important dans la consommation énergétique d'un site intégré. En dehors de ces postes, les hauts fourneaux sont également fortement émetteurs, essentiellement via l'énergie consommée par les cowpers pour produire le vent chaud, suivi de la cokerie du fait de l'énergie consommée pour la montée en température des fours, puis l'agglomération par la combustion de charbon et de coke pour le frittage du minerai ainsi que les émissions de procédé liées à la décarbonatation de la castine et de la dolomie utilisées comme fondant.



Figure 34: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Emissions de GES.

3.2.2.1. Modélisation de l'agglomération

L'agglomération a été modélisée d'après le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 6. En pratique, le combustible solide consommé à l'agglomération est un mélange de charbon et de rebus de coke (ou « poussier »), mais par simplification pour le bilan carbone, il a été supposé qu'il s'agit de coke, raison pour laquelle c'est bien du coke qui apparaît dans le tableau et non du poussier de coke. Cela revient à supposer que le coke et le poussier de coke ont un facteur d'émission identique.

Commodité	Unité	Consommation pour 1 t d'aggloméré	Source
Coke	kWh	120	ADEME
Gaz de cokerie	kWh	14	ADEME
Électricité	kWh	60	ADEME
Chaux	t	0,006	ADEME
Dolomie	t	0,015	ADEME

<i>Minerai de fer</i>	t	1,346	[52]
<i>Castine</i>	t	0,127	ADEME
<i>Charbon</i>	kWh	279	ADEME
<i>CO₂</i>	tCO ₂	Bilan carbone	

Tableau 6: Modélisation de l'agglomération.

3.2.2.2. Modélisation de la cokerie

La cokerie a été modélisée d'après le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 7. Lorsque la consommation est indiquée avec un signe négatif, cela signifie que le poste en question est producteur de matière ou d'énergie et non consommateur. C'est le cas ici avec le gaz de cokerie, le benzol et le goudron.

Commodité	Unité	Consommation pour 1 kWh de coke	Source
Gaz de cokerie (consommation)	kWh	0,017	ADEME
Gaz de cokerie (production)	kWh	-0,288	[52]
Gaz de haut fourneau	kWh	0,089	ADEME
Gaz de convertisseur	kWh	0,023	ADEME
Électricité	kWh	0,010	ADEME
Vapeur	kWh	0,013	ADEME
Fioul domestique	kWh	0,006	ADEME
Charbon à coke	kWh	1,447	ADEME
Benzol	kWh	-0,018	[32]
Goudron	kWh	-0,060	[32]
CO ₂	tCO ₂	Bilan carbone	

Tableau 7: Modélisation de la cokerie.

3.2.2.3. Modélisation du haut fourneau

Le haut fourneau a été modélisé selon le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 8. La variable de fonctionnement *part_biocharbon_HF* y est définie pour représenter l'intégration possible de biocharbon en remplacement du charbon pulvérisé fossile.

Commodité	Unité	Consommation pour 1 t de fonte	Équation	Source
Coke	kWh	2491		ADEME
Aggloméré	t	1,356		ADEME
Gaz de cokerie	kWh	60		ADEME
Gaz de haut fourneau (consommation)	kWh	375		ADEME
Gaz de haut fourneau (production)	kWh	-1350		[52]
Gaz de convertisseur	kWh	36		ADEME
Électricité	kWh	95		ADEME
Vapeur	kWh	14		ADEME
Oxygène	Nm ³	38		[52]
Gaz réseau	kWh	9		ADEME
Laitier de haut fourneau	t	-0,298		[53]
Biocharbon pulvérisé	kWh	1501 · <i>part_biocharbon_HF</i>	Équation 1	ADEME
Charbon pulvérisé	kWh	1501 · (1 - <i>part_biocharbon_HF</i>)	Équation 2	ADEME
CO ₂	tCO ₂	Bilan carbone		

Tableau 8: Modélisation du haut fourneau.

3.2.2.4. Modélisation de l'aciérie de conversion

L'aciérie de conversion a été modélisée selon le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 9.

Commodité	Unité	Consommation pour 1t d'acier liquide	Équation	Source
Fonte	t	1,1 – taux_de_ferrailles_convertisseur	Équation 3	
Ferrailles	t	taux_de_ferrailles_convertisseur	Équation 4	
Gaz de convertisseur	kWh	190,2 · taux_de_ferrailles_convertisseur – 209,3	Équation 5	ADEME
Gaz de cokerie	kWh	11		ADEME
Électricité	kWh	64		ADEME
Vapeur	kWh	21		ADEME
Oxygène	Nm3	60		[52]
Gaz réseau	kWh	15		ADEME
Chaux	t	0,024		[31]
Dolomie	t	0,009		[31]
Azote	Nm3	23		[53]
FeMnC	t	0,0119		[58]
FeSi-75	t	0,0033		[58]
Aluminium pour désoxydation	t	0,0016		[58]
Laitier de convertisseur	t	-0,085		[53]
CO ₂	tCO ₂	Bilan carbone		

Tableau 9: Modélisation de l'aciérie (convertisseur à oxygène).

Cette modélisation comporte trois équations matérialisant les caractéristiques suivantes :

- Les intrants ferreux se partagent entre fonte issue des hauts fourneaux (Équation 6) et ferrailles (Équation 7). Leur niveau de consommation dépend du taux de ferrailles dans le convertisseur, qui est défini comme la masse de ferrailles incorporée rapportée à la masse d'acier liquide produit²⁴ et est représenté par la variable *taux_de_ferrailles_convertisseur*. Il a été considéré que le procédé induit une perte de matière constante, telle que la quantité d'intrants ferreux nécessaire pour produire l'acier liquide suit un ratio 1,1 : 1. En pratique ce n'est pas tout à fait exact : l'ajout de ferrailles a tendance à diminuer les pertes matières.

²⁴ Il ne s'agit donc pas de la part de ferrailles relativement aux intrants mais au produit sortant. Cela peut induire une confusion en comparaison à la part de ferrailles dans les fours à arc électrique, que l'on définit, cette fois, relativement à la masse d'intrants. Par ailleurs, les hypothèses prospectives relatives à la part de ferrailles tolérable vis-à-vis du carnet de commande des sidérurgistes sont prises sur la base de la métrique relative à la masse d'intrants et diffèrent donc aussi de la variable considérée ici.

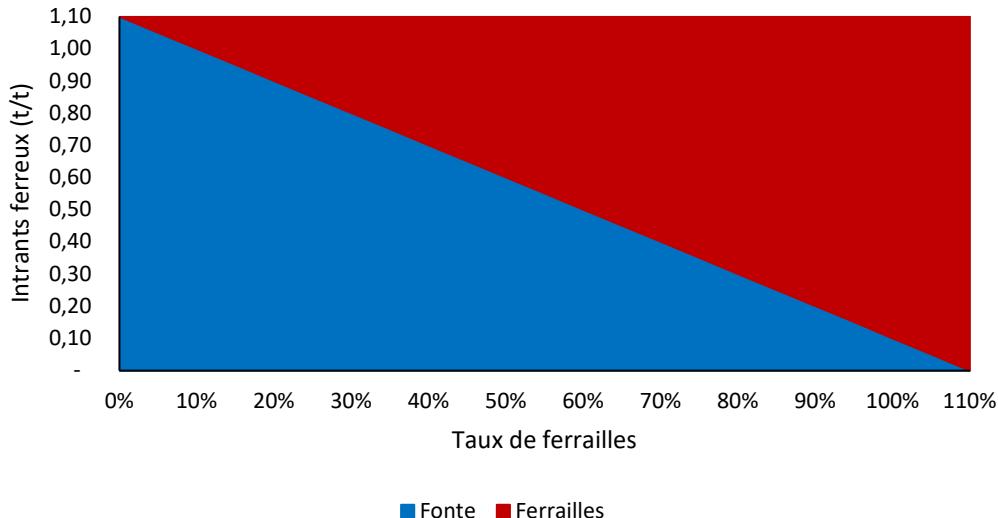


Figure 35: Modélisation de la consommation spécifique d'intrants ferreux dans le convertisseur à oxygène.

3.2.2.5. Modélisation de la première transformation

La coulée continue, le réchauffage et le laminage ont été modélisés comme un tout, selon le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 10.

Commodité	Unité	Consommation pour 1t de bobine	Source
Acier liquide	t	1	ADEME
Gaz de cokerie	kWh	295	ADEME
Gaz de haut fourneau	kWh	17	ADEME
Gaz de convertisseur	kWh	58	ADEME
Électricité	kWh	155	ADEME
Vapeur interne	kWh	10	ADEME
Gaz réseau	kWh	43	ADEME
CO ₂	tCO ₂	Bilan carbone	

Tableau 10: Modélisation de la coulée continue et du laminage à chaud.

3.2.2.6. Modélisation du séparateur d'air

Le séparateur d'air (ASU) a été modélisé d'après le bilan entrée-sortie présenté sur le Tableau 11.

Commodité	Unité	Consommation pour 1 Nm ³ d'oxygène	Source
Électricité	kWh	0,86	[52]
Air	Nm ³	5,3	[31]

Tableau 11: Modélisation de l'ASU.

3.2.3. Technologies de décarbonation des hauts fourneaux

3.2.3.1. Augmentation du taux de ferrailles dans le convertisseur

De la ferraille ou du DRI (mineraï de fer pré-réduit) peuvent être injectés dans le convertisseur à oxygène, en remplacement de la fonte, ce qui permet d'en diminuer la consommation par tonne d'acier produit. La fonte étant l'élément du procédé responsable de la grande majorité des émissions, ce levier de décarbonation est particulièrement efficace. Le taux de substitution est cependant limité par l'effet refroidissant du DRI et de la ferraille, par la présence d'impuretés dans la ferraille, par la température de la fonte, et il dépend des installations [59].

Dans ses rapports annuels [60], le groupe ArcelorMittal, qui est le seul acteur à produire de l'acier par la filière haut fourneau en France, donne le taux de ferrailles utilisé dans la filière fonte (c'est-à-dire dans le convertisseur à oxygène) ainsi que les volumes recyclés. Les données sont présentées sur la Figure 36. Depuis 2017, le taux de ferrailles dans la filière fonte (incluant le recyclage de ferrailles usagées ainsi que les chutes neuves de production d'acier et de fabrication des produits) est compris entre 14 et 20 % et le volume de ferrailles recyclées est en moyenne de 1,7 Mt/an. En Chine par exemple, le taux de ferraille moyen dans les convertisseurs à oxygène a augmenté jusqu'à atteindre environ 20 % [61]. L'ajout de ferrailles externes au convertisseur a pour effet de refroidir l'acier et la température dite de « fin de soufflage ». Il peut donc être nécessaire de corriger cette température avec, par exemple, un four électrique de réchauffage en aval du processus de conversion comme dans le cas du récent projet d'ArcelorMittal Fos-sur-Mer [62]. En dehors du gain CO₂, la substitution de fonte par des ferrailles dans le convertisseur présente plusieurs autres avantages : réduction de l'usure des réfractaires, réduction de l'oxydation de la charge métallique et donc des pertes en fer et réduction de la quantité de laitier car issu essentiellement de la fonte et de la suroxydation.

Il est estimé qu'environ un tiers de cette ferraille utilisée dans la filière fonte en France provient de déchets externes en fin de vie ; les deux tiers restants proviennent de chutes neuves internes où liées à la transformation de l'acier sur d'autres sites²⁵.

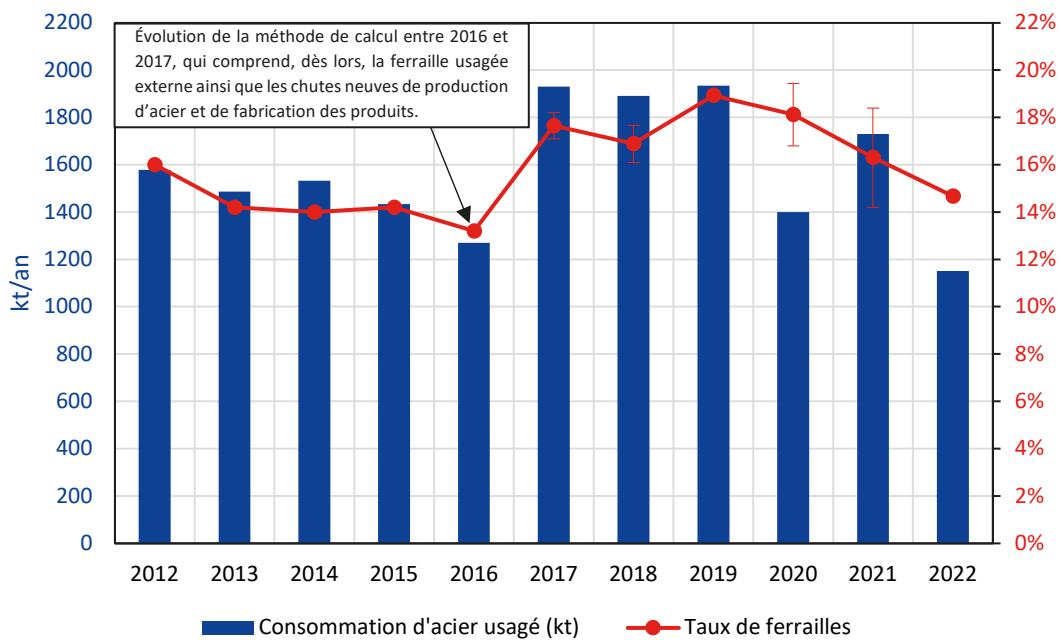


Figure 36: Evolution du recyclage de ferrailles dans la filière fonte en France par le groupe ArcelorMittal²⁶.

D'après B. Voraberger et al. (2022) [68], le taux de ferrailles maximal dans le convertisseur est limité à environ 20 % en l'absence de mesures particulières. Toutefois, certains dispositifs technologiques permettent d'atteindre un taux de 30 % comme le préchauffage par lance dans le convertisseur, la fusion préalable dans un four annexe ou l'optimisation des flux de chaleur permettent d'atteindre ce taux. G. Brooks et al. (2022) [69] conclut également à un taux maximal de 29 %. Des taux de ferrailles même au-delà de 30 % seraient atteignables [68]. En effet, T. Bradaric et al. (2016) [70] rapporte le cas de l'entreprise Mittal Steel USA qui, après avoir testé une vingtaine de mesures sur plusieurs sites, conclut qu'il est possible d'atteindre un taux de fonte liquide de 66 % dans le convertisseur, soit un taux de ferrailles de 34 %. Dans la modélisation, le taux de ferrailles maximal dans le convertisseur a été fixé à 30 %.

Par ailleurs, une bonne qualité de ferraille peut être assurée par un gisement contenant peu d'impuretés (achat d'un grade particulier ou ferraille interne), ou par un tri et nettoyage sur site. La modélisation prend en compte un traitement sur site

²⁵ Cette estimation se base sur des données publiques. À Dunkerque, 1 à 1,4 Mt de ferrailles sont consommées, dont 60 % de ferrailles internes et 40 % de ferrailles externes issues de centres de tri [63], [64], [65] soit 0,5 Mt. Connaissant la consommation totale de ferrailles d'ArcelorMittal en France, il peut être estimé que le site de Fos consomme entre 0,4 et 0,8 Mt de ferrailles, dont environ 100 kt sont des ferrailles externes (soit 10 à 20 % environ) [66], [67]. La consommation totale de ferrailles externes en convertisseur est donc d'environ 0,5 + 0,1 = 0,6 Mt pour une consommation totale de ferrailles d'environ 1,7 Mt, soit un ratio proche de 1/3.

²⁶ La barre d'incertitude sur le taux de ferrailles est due à des variations des mêmes indicateurs selon les différents rapports RSE d'ArcelorMittal et par rapport aux valeurs de taux de ferrailles calculées (volume d'acier usagé consommé rapporté à la production d'acier liquide dans la filière fonte).

pour permettre la prise en compte des CAPEX et l'augmentation du coût de production lié à ce traitement de la ferraille. Une hypothèse ADEME de coût d'investissement de 140 EUR/t_{ferraille supplémentaire} a été retenue.

3.2.3.2. Modélisation de l'augmentation du taux de ferrailles

Dans la modélisation, il a été supposé que l'enfournement de ferrailles représente 170 kg/t_{acier} entre 2015 et 2022, dont 64 % sont issues de déchets externes en fin de vie.

L'augmentation du taux de ferrailles est modélisée comme un simple ajustement de la variable de fonctionnement associée dans le convertisseur à oxygène (*taux_de_ferrailles_convertisseur* – voir Tableau 9). L'augmentation de ce taux au-delà de 20 % se traduit implicitement par la mise en place de procédés de traitement et de préchauffage des ferrailles et se matérialise autrement dans la modélisation par la prise en compte d'une dépense d'investissement (à hauteur de 140€/t_{ferrailles supplémentaires·an})²⁷.

3.2.3.3. Changement d'agents réducteurs

La substitution d'autres agents réducteurs au coke dans le haut fourneau est une pratique courante, principalement motivée par des raisons économiques (le coke est un intrant cher). À ce jour, le charbon pulvérisé est le principal agent réducteur auxiliaire utilisé pour remplacer le coke, mais des hydrocarbures liquides et du gaz naturel sont aussi couramment injectés dans le haut fourneau [71]. Depuis les années 60 et à la suite des choc pétroliers, des améliorations ont permis de réduire d'environ de moitié la consommation d'agents réducteurs dans le haut fourneau, et notamment de coke (Figure 37)²⁸ [72]. La consommation totale d'agents réducteurs est passée par un minimum aux alentours des années 2000 avant de légèrement réaugmenter du fait du remplacement toujours plus important du coke par du charbon pulvérisé (le charbon pulvérisé est un peu moins efficace que le coke). Aujourd'hui, la consommation moyenne d'agents réducteurs tend vers un plateau aux alentours de 500 kg/t_{fondue}, pour un taux de coke d'environ 330 kg/t_{fondue}. Certains hauts fourneaux en Europe fonctionnent avec un taux de coke compris entre 220 et 250 kg/t_{fondue} [73]. Il a été estimé qu'un taux de coke minimum théorique de 200 kg/t_{fondue} était nécessaire [71] car le coke reste toujours indispensable pour assurer une fonction mécanique. De plus, le taux d'injection de charbon pulvérisé pour remplacer le coke est en pratique limité du fait d'une combustion incomplète de celui-ci. C'est la raison pour laquelle l'idée d'utiliser un gaz réducteur à la place d'un agent réducteur solide a été introduite dès le début du XX^{ème} siècle [71].

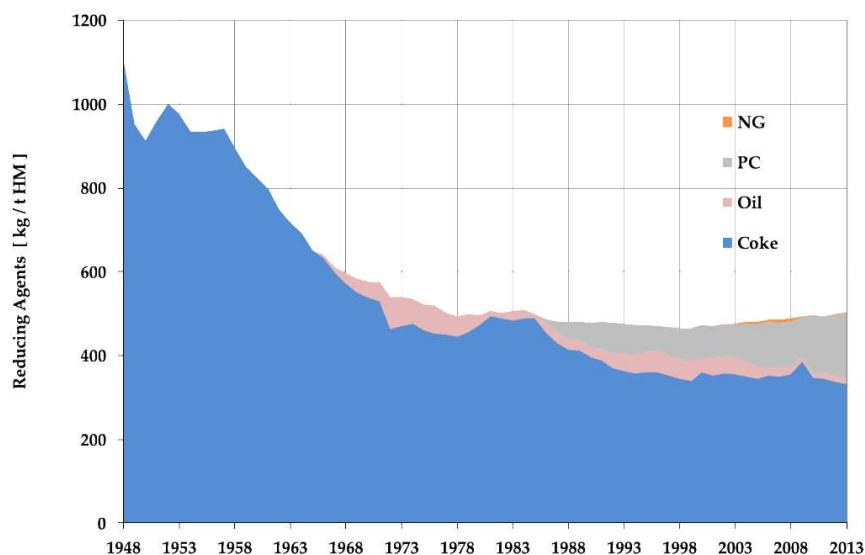


Figure 37: Evolution historique de la consommation d'agents réducteurs dans les hauts fourneaux en Europe [72].

3.2.3.3.1. Injection de gaz naturel dans les hauts fourneaux

L'injection directe de gaz naturel dans les hauts fourneaux permet de remplacer une partie du coke et de réduire les émissions de CO₂ mais, pour cela, le gaz naturel doit être préchauffé et l'air doit potentiellement être enrichi en O₂. C'est une technique déjà pratiquée aux Etats-Unis depuis plus d'une vingtaine d'années, où la consommation moyenne de gaz naturel était, en 2015, d'environ 60 kg/t_{fondue}. D'après C. De Maré (2022) [37], pour un préchauffage à 320 °C, le taux d'injection maximal en tuyère principale est de 140 kg/t_{fondue}. D'après M. Jampani (2016) [74], pour un vent chaud à une température de 900 °C, le

²⁷ La mise en place de la technologie revient donc implicitement à étendre le domaine de définition de la variable *taux_de_ferrailles_convertisseur* au-delà de 20%.

²⁸ NG = Gaz naturel, PC = Charbon pulvérisé

taux d'injection maximal en tuyère principale est de $150 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$ et, pour un vent à 1100°C , le taux maximal augmente à $175 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$. L'injection peut se faire au niveau des tuyères principales mais également au niveau du « *shaft* », juste au-dessus du ventre (voir Figure 38) [74].

L'injection de gaz naturel a un effet endothermique et a donc tendance à diminuer la température de flamme. C'est la raison pour laquelle l'air doit être enrichi en oxygène. Toutefois, l'enrichissement en oxygène a pour effet de réduire la teneur en azote ce qui a tendance à faire diminuer la température de sortie des gaz en haut du haut fourneau. Or, cette température doit rester au-dessus du point de rosée (à environ 110°C pour les gaz de sortie) pour éviter la condensation d'eau dans la partie supérieure du haut fourneau. L'injection de gaz naturel en tuyère est ainsi techniquement limitée par la température de flamme et la température de sortie des gaz [74]. L'injection au niveau du *shaft* permet de contourner en partie cette limite et permet une plus grande plage d'injection sans compromettre le fonctionnement du haut fourneau. Les calculs de M. Jampani (2016) [74] permettent d'estimer un taux d'injection maximal d'environ $200 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$ lorsque que le gaz naturel est injecté au *shaft*.

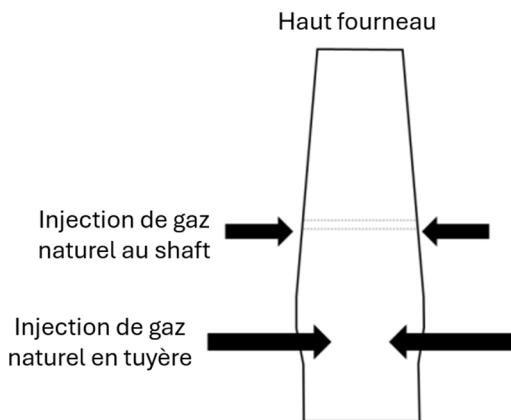


Figure 38: Schéma d'un haut fourneau avec injection de gaz naturel en tuyère principale telle que déjà pratiquée et la configuration avec injection au niveau en shaft (adapté de [74]).

Modélisation de l'injection de gaz naturel dans les hauts fourneaux

L'injection de gaz naturel n'a pas été prise en compte dans les trajectoires de décarbonation : les technologies d'injection de gaz de cokerie et de recirculation des gaz de haut fourneau lui ont été privilégiées.

Si ce levier avait été modélisé, une injection de gaz naturel au niveau du *shaft* aurait été retenue, pour un taux d'injection maximal de $200 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$. Pour le calcul des gains d'émissions de CO₂ et de l'impact sur les consommations énergétiques, le remplacement du coke par l'injection de gaz naturel peut être approché par une fonction linéaire, telle que présentée sur la Figure 39 issue de M. Jampani (2016) [74]. Par approximation graphique, un taux d'injection de gaz naturel de $200 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$ entraîne une consommation de coke de $225 \text{ kg/t}_{\text{fonte}}$. Pour l'injection en *shaft*, la demande supplémentaire en oxygène est de 1 kgO_2 par kilogramme de gaz naturel et l'énergie supplémentaire nécessaire pour préchauffer le gaz est de $2,45 \text{ MJ}$ par kilogramme de gaz naturel avec, par ailleurs, un dispositif de préchauffage dont l'efficacité peut être estimée à 60 %.

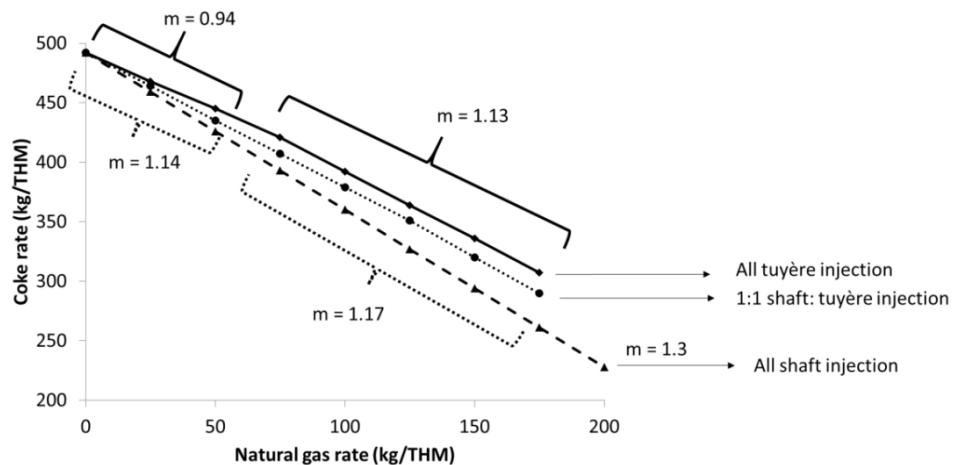


Figure 39: Estimation du taux de coke en fonction du taux d'injection de gaz naturel selon trois modes d'injections : une injection en tuyère principale uniquement, une injection au shaft et une injection 50/50 en tuyère et au shaft [74].

L'utilisation de gaz naturel a également un impact sur la productivité²⁹ du haut fourneau selon que l'injection se fait au niveau des tuyères principales ou au *shaft* (voir Figure 40). Enfin, l'injection de gaz naturel modifie également la composition des gaz de sortie du haut fourneau. En particulier, ces gaz s'enrichissent en H₂ et H₂O et s'appauvriscent en CO₂ et N₂ ce qui a pour effet d'augmenter le pouvoir calorifique moyen. Il peut être supposé que le pouvoir calorifique croît linéairement avec le taux d'injection de gaz naturel.

Le coût d'investissement pour faire les aménagements nécessaires pour l'injection de gaz naturel a été pris à 10 MEUR [75] pour un haut fourneau d'une capacité de 2 Mt_{fond}/an.

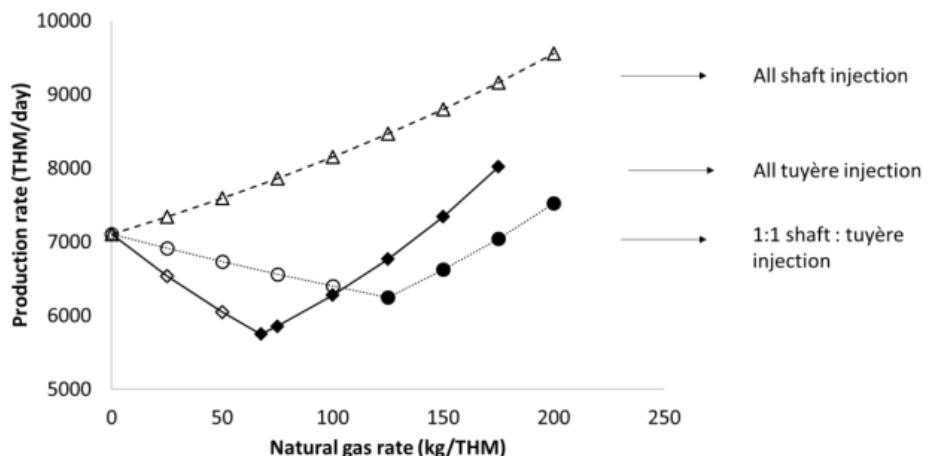


Figure 40: Estimation de l'impact de l'injection de gaz naturel sur la productivité du haut fourneau selon trois modes d'injection : une injection en tuyère principale uniquement, une injection au shaft et une injection 50/50 en tuyère et au shaft [74].

3.2.3.3.2. Injection d'hydrogène dans les hauts fourneaux

L'injection directe d'hydrogène pour la réduction du minerai de fer dans les hauts fourneaux est une innovation et un levier de décarbonation de la production d'acier en diminuant l'utilisation de charbon et de coke [71]. Pour les sidérurgistes, c'est en général une solution de court terme, prolongeant la durée de vie des hauts fourneaux. Cette solution peut être mise en œuvre conjointement avec la recirculation des gaz sidérurgiques (voir 3.2.3.3.4). Si l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau, l'oxygène coproduit peut être utilisé pour enrichir le vent chaud ou l'air de combustion dans les cowpers, qui sont des réchauffeurs d'air destinés à fournir le vent chaud soufflé aux tuyères de hauts fourneaux (voir Figure 41 Figure 41).

²⁹ La « productivité » s'entend comme la production journalière maximale.

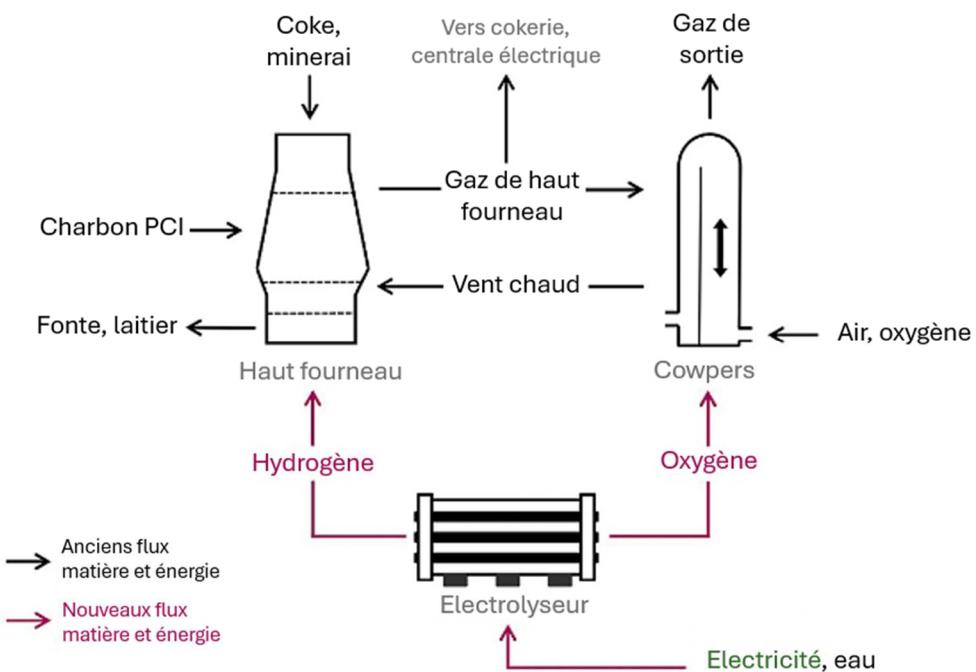


Figure 41: Hydrogène produit par électrolyse comme agent réducteur auxiliaire au sein du haut fourneau (schéma adapté de [71]).

Des essais à l'échelle industrielle ont été menés par le groupe Thyssenkrupp sur le site de Duisbourg en Allemagne. Cependant, les modélisations théoriques montrent que cette injection directe d'hydrogène dans les hauts fourneaux pourrait remplacer au maximum 21,4 à 24 % du carbone habituellement nécessaire. Cette limite est liée à la fonction mécanique du coke dans le réacteur [76].

Dans le cadre d'un projet transfrontalier IPCEI de transport d'hydrogène entre la France et l'Allemagne, les groupes sidérurgiques Saarstahl et Dillinger ont lancé le projet H2Syngas sur le site intégré de ROGESa Roheisengesellschaft Saar mbH. Le projet consiste à enrichir le gaz de cokerie en hydrogène pour utilisation directe dans le haut fourneau en tant que gaz réducteur et ainsi réduire la consommation de coke. Cette réutilisation de gaz réducteur au sein même du procédé permettrait de réduire jusqu'à 12 % les émissions de CO₂ [77]. En avril 2023, le groupe indien Tata Steel a démarré des tests d'injection d'hydrogène dans l'un des six hauts fourneaux du site sidérurgique de Jamshedpur dans l'est du pays. A terme, les tests d'injection auront le potentiel de réduire la consommation de coke de 10 %, soit une baisse des émissions de CO₂ de 7 à 10 % [78].

L'hydrogène possédant une grande capacité thermique, l'injection directe d'hydrogène à basse température (tout comme le gaz naturel) a tendance à réduire la température de flamme en-dessous du seuil de fonctionnement. Pour rester dans des conditions d'opération stables, il est donc nécessaire de réduire le débit du vent, de l'enrichir en oxygène pour brûler plus de coke et de préchauffer l'hydrogène [71]. L'injection d'hydrogène a également pour effet d'augmenter la productivité du haut fourneau, jusqu'à presque 14 % dans le meilleur des cas selon V. Shatokha (2022) [79]. Le taux d'injection maximal d'H₂ a été estimé à 27,5 kg/t_{fond} d'après C. Yilmaz et al. (2017) [71] et à 28,3 kg/t_{fond} d'après V. Shatokha (2022) [79] lorsque l'air est enrichi en oxygène à 33 %_{vol}. Enfin, la littérature indique que l'injection d'hydrogène est préférable au niveau des tuyères principales. En effet, des résultats expérimentaux conduits sur l'injection d'hydrogène au niveau du *shaft* montrent que l'hydrogène a tendance à s'échapper le long des parois intérieures du fait d'un flux ascendant trop fort ce qui limite grandement son potentiel de réduction du minerai de fer [79]. Dans ce travail, il a ainsi été supposé que l'injection d'hydrogène se faisait au niveau des tuyères principales. Toutefois, même dans ce cas, il est important de noter que l'hydrogène n'est pas consommé en totalité pour la réduction des oxydes. Le taux d'utilisation de l'hydrogène dans la réaction se situe aux alentours de 50-55 %, le reste se retrouvant dans les gaz de sortie du haut fourneau [79].

Modélisation de l'injection d'hydrogène dans les hauts fourneaux

L'injection d'hydrogène n'a pas été prise en compte dans les trajectoires de décarbonation : les technologies de DRI-H2, d'injection de gaz de cokerie et de recirculation des gaz de haut fourneau lui ont été privilégiées.

Pour modéliser ce levier de décarbonation, les données et résultats de V. Shatokha (2022) [79] peuvent être utilisés. Pour simplifier, il est supposé que l'air du vent est enrichi à 33 %_{vol} en oxygène permettant ainsi une plus grande plage d'injection d'H₂, jusqu'à 28,3 kg/t_{fond} au maximum. Malgré l'impact positif du préchauffage de l'hydrogène sur la consommation de coke et les émissions de CO₂, l'hydrogène est supposé être injecté froid du fait des risques techniques d'inflammabilité que pose

le chauffage. Dans ces conditions, l'impact de l'injection directe d'hydrogène sur les émissions CO₂ peut être quantifié sur la base de la Figure 42, l'impact sur le taux de remplacement de coke sur la base de la Figure 43 et l'impact sur la productivité du haut fourneau sur la base de la Figure 44.

Le coût d'investissement de cette technologie peut être estimé à 150 MEUR [75] pour un haut fourneau d'une capacité de 2 Mt_{fondue}/an. Il est supposé que ce montant comprend par ailleurs le coût de l'électrolyseur.

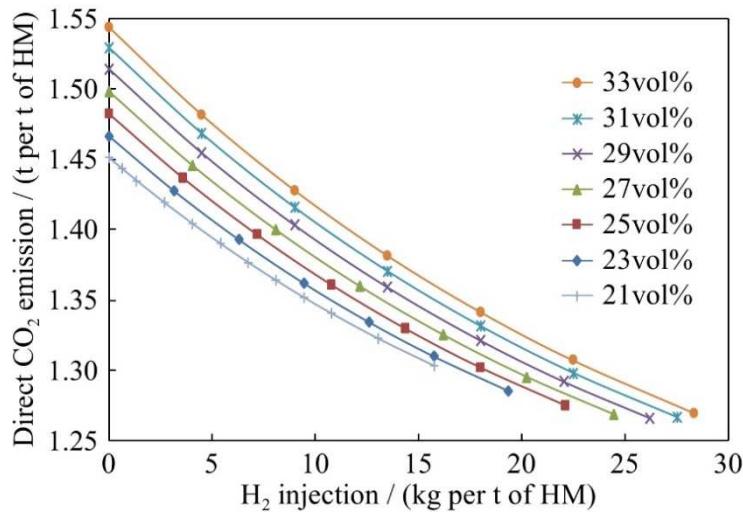


Figure 42: Effet de l'injection d'hydrogène sur les émissions directes de CO₂ pour une teneur du vent en oxygène comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].

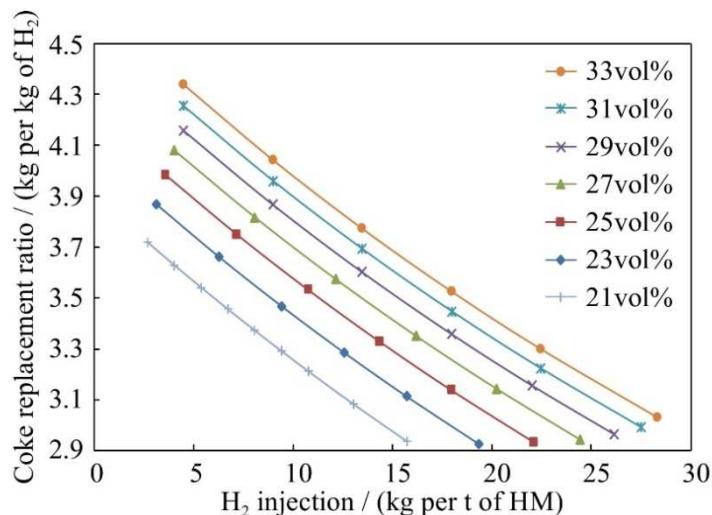


Figure 43: Taux de remplacement de coke pour une teneur du vent en oxygène comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].

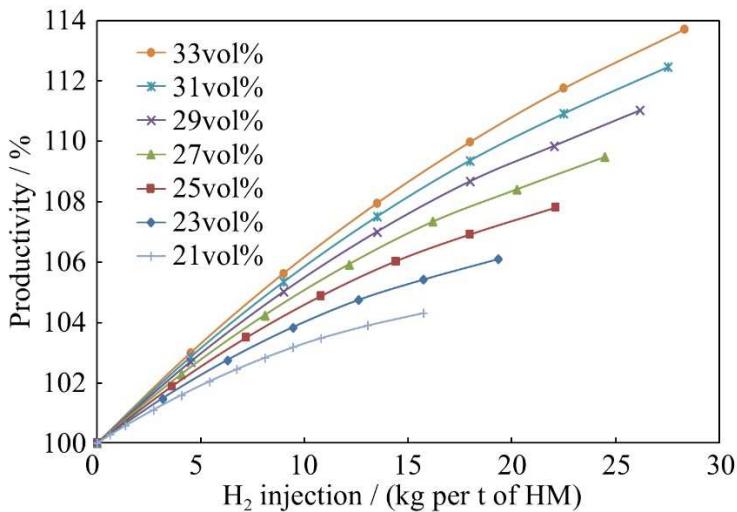


Figure 44: Effet de l'injection d'hydrogène sur la productivité pour une teneur en oxygène du vent comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].

3.2.3.3.3. Injection de gaz de cokerie dans les hauts fourneaux

Le gaz de cokerie étant particulièrement riche en hydrogène (H_2) et en méthane (CH_4), il peut être tout à fait pertinent de le valoriser en injection dans les hauts fourneaux comme agent réducteur. Du point de vue du haut fourneau, il s'agit finalement d'une sorte de combinaison des deux techniques précédentes. Les premiers essais d'injection ont été faits aux Etats-Unis, au milieu des années 90 [80]. Aujourd'hui, la technique n'est pas encore largement déployée mais elle a toutefois été mise en œuvre à l'échelle industrielle en 2021 sur le haut fourneau B du site ArcelorMittal Gijón, en Espagne [81] ou encore en 2019 sur le site ROGESa Roheisengesellschaft Saar mbH du groupe Saarstahl à Dillingen, en Allemagne [82].

D'après les résultats de H. Wang et al. (2016) [47], l'injection de gaz de cokerie permet de réduire les émissions de CO_2 du haut fourneau de 6 à 7 % et, tout comme l'injection d'hydrogène, a pour effet d'augmenter la productivité du haut fourneau, d'environ 20 %. L'injection de gaz de cokerie peut également être combinée à la recirculation des gaz sidérurgiques (voir partie 3.2.3.3.4).

Modélisation de l'injection de gaz de cokerie dans les hauts fourneaux

En cas d'injection de gaz de cokerie seul, les résultats de H. Wang et al. (2016) [47] permettent de faire l'hypothèse que la consommation spécifique de coke est abaissée à 309,3 kg/t_{fond}³⁰ et que celle de charbon pulvérisé est abaissée à 120,6 kg/t_{fond}³¹. De plus, sur la base de la composition des gaz, il a été estimé que l'injection de gaz de cokerie avait pour effet de porter la production de gaz de haut fourneau à 1 500 kWh/t_{fond} contre 1 350 kWh/t_{fond} dans l'usine de référence REF1. Tout comme l'injection de gaz naturel, le coût d'investissement pour l'injection de gaz de cokerie a été pris à 10 MEUR [75] pour un haut fourneau d'une capacité de 2 Mt_{fond}/an.

Commodité	Unité	Valeur d'origine /t _{fond}	Nouvelle valeur /t _{fond}
Coke	kWh	2491	2406
Gaz de haut fourneau (production)	kWh	-1350	-1500
Biocharbon pulvérisé	kWh	1501 · part_biocharbon_HF	1072 · part_biocharbon_HF
Charbon pulvérisé	kWh	1501 · (1 - part_biocharbon_HF)	1072 · (1 - part_biocharbon_HF)
CO_2	tCO ₂	Bilan carbone	

Tableau 12: Effet de l'injection de gaz de cokerie sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.

3.2.3.3.4. La recirculation des gaz sidérurgiques (TGR-BF)

Les gaz s'échappant du haut fourneau et de la cokerie contiennent de grandes quantités d'hydrogène (H_2) et de monoxyde de carbone (CO). Ces gaz sont aujourd'hui principalement valorisés en combustion en centrale thermique ou dans les

³⁰ Soit $309,3 \cdot 28 / 3,6 = 2406$ kWh/t_{fond} en prenant en compte un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 28 GJ/t pour le coke.

³¹ Soit $120,6 \cdot 32 / 3,6 = 1072$ kWh/t_{fond} en prenant en compte un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 28 GJ/t pour le charbon pulvérisé.

procédés aval de première transformation sur site. Les valoriser comme agent réducteur dans le haut fourneau permettrait de diminuer la quantité de coke nécessaire à la production d'acier primaire.

La technologie TGR-BF (pour « Top Gas Recycling Blast Furnace » en anglais) consiste à faire recirculer les gaz sidérurgiques avec un potentiel réducteur dans le haut fourneau afin de diminuer la consommation de coke et réduire les émissions de CO₂. De plus, lors de la recirculation, le CO₂ est séparé des autres gaz, générant de ce fait un flux très pur qui peut être facilement capté pour être stocké géologiquement. Plusieurs versions du procédé ont déjà été proposées et testées en 2007 sur un haut fourneau expérimental détenu par la société LKAB à Luleå, en Suède. L'injection du gaz de haut fourneau peut se faire soit en tuyère (à la base du réacteur), soit en cuve après réchauffage. La meilleure des configurations au sens des émissions (version 4 sur la Figure 45) correspond justement à une situation où les gaz de cokerie sont injectés en tuyère et où les gaz de haut fourneau sont injectés en cuve après réchauffage. Dans ce cas, les émissions de CO₂ ont été réduites de 24 % avec un fonctionnement stable des équipements et une bonne qualité de fonte [31], [47], [83]. Les gaz de cokerie, riches en H₂, peuvent également être recirculés pour injection dans le haut fourneau. Du fait d'une plus grande réactivité de l'H₂ par rapport au CO, la recirculation des gaz de haut fourneau a pour effet d'augmenter la productivité du haut fourneau, de 15,7 % d'après M. Chu & J.I. Yagi (2010) [84] tout en diminuant les émissions de CO₂ de 16,8 %.

Avant d'atteindre ces performances et des opérations stabilisées, la mise en place d'un système TGR-BF sur un haut fourneau causerait un arrêt prolongé assez long et donc une perte de capacité de production et de profits pour l'entreprise au moins le temps des travaux [31].

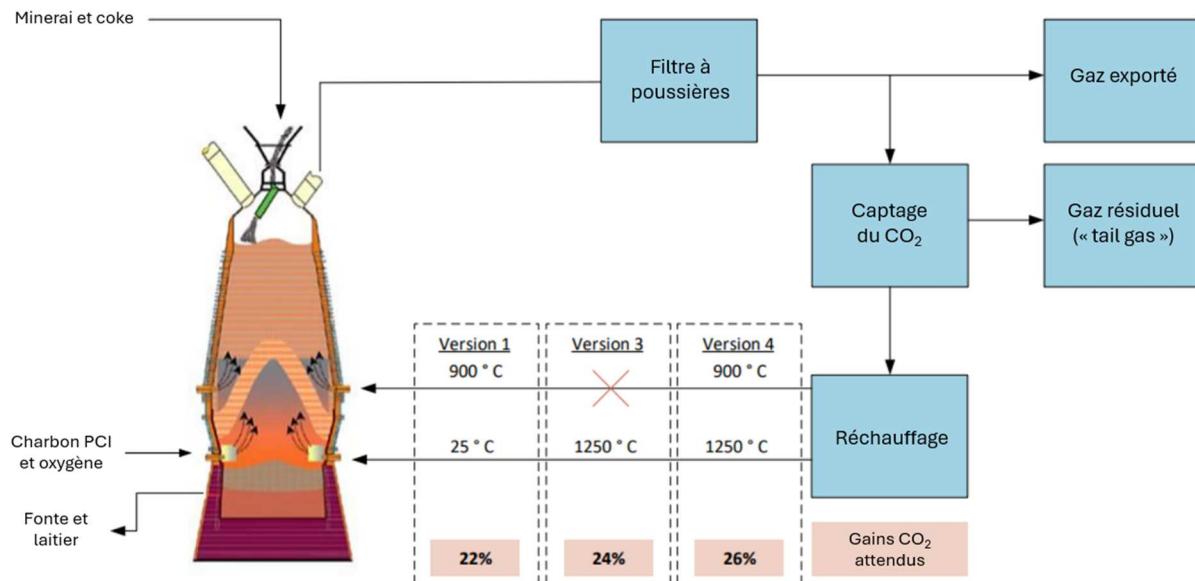


Figure 45: Schéma simplifié du procédé de recyclage des gaz de haut fourneau (TGR-BF) (adapté de [31]).

La mise en place d'une technologie TGR-BF a pour effet de diminuer d'environ de moitié la production de gaz sidérurgiques en valeur énergétique (voir Figure 46 issue de J. Song et al. (2019) [52]). En effet, d'une part, la production de gaz de haut fourneau est largement réduite parce que leur potentiel réducteur est valorisé lors de la recirculation et, d'autre part, la production de gaz de cokerie diminue également du fait d'une moindre consommation de coke dans les hauts fourneaux. Dans cette configuration, la centrale de production d'énergie devient caduque ou presque car il n'y a plus de gaz sidérurgiques résiduels à valoriser. Parallèlement, la consommation électrique augmente de 89 % au niveau du haut fourneau du fait de l'élimination du CO₂ par VPSA [56].

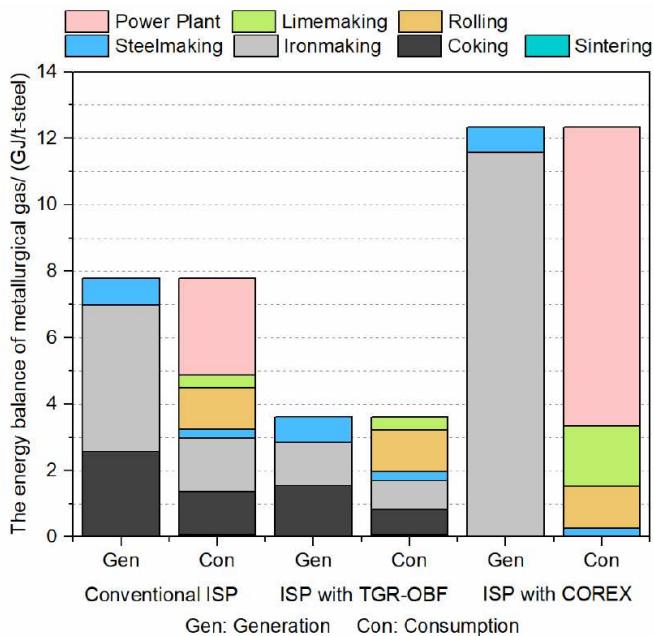


Figure 46: Comparaison de l'équilibre des gaz sidérurgiques sur un site intégré conventionnel (ISP), avec une technologie TGR-BF et avec une technologie COREX³² [52].

L'élimination du CO₂ de la boucle de recirculation se fait par une technologie de captage de type VPSA. Une fois celui-ci évacué, il peut être envoyé pour transport et stockage moyennant une étape supplémentaire de captage par cryogénie et de purification. Dans la modélisation, le transport et stockage du CO₂ s'envisage comme une option additionnelle une fois la technologie TGR-BF mise en place. À ce sujet, les hypothèses retenues sont détaillées dans la partie 3.2.3.4.

Modélisation de la recirculation des gaz de haut fourneau

La modélisation de la technologie TGR-BF se base essentiellement sur les hypothèses et résultats de J. Song et al. (2019) [52], de P. Jin et al. (2017) [56] et une étude de l'IEAGHG (2013) [57]. Sur la base de données de D. Santis et al. (2021) [75], il a été supposé que le coût d'investissement pour une technologie TGR-BF sans captage serait de 110 EUR/t_{fondue}.an (soit, par exemple, un coût total d'investissement de 220 MEUR pour un haut fourneau d'une capacité annuelle de 2 Mt) et 150 EUR/t_{fondue}.an avec captage du CO₂ (chiffre qui inclut par ailleurs les étapes de purification et de compression).

Telle que la technologie est modélisée, la recirculation des gaz sidérurgiques permet d'abattre 22 % des émissions directes de l'usine de référence REF1 tel qu'illustré sur la Figure 47. Le graphique permet également de constater une redistribution des sources d'émissions de CO₂. Tout d'abord, la recirculation des gaz permet de réduire la consommation de coke aux hauts fourneaux, ce qui a pour effet de diminuer la production de la cokerie et donc les émissions de CO₂ au niveau de ce poste-là. Ensuite, cette recirculation a pour effet de réduire considérablement la disponibilité en gaz de cokerie et en gaz de haut fourneau pour la centrale thermoélectrique. La production de la centrale a été maintenue à un niveau minimum de manière à assurer les besoins en vapeur du site en complétant avec de la combustion de gaz naturel. Tout se passe comme si le carbone contenu dans le coke et le charbon d'injection était en fait bien mieux utilisé pour la réduction des oxydes de fer. En ce sens, la recirculation de gaz sidérurgiques peut d'ailleurs être considérée comme une technologie d'efficacité énergétique. Alors que les gaz de haut fourneau étaient auparavant distribués sur de nombreux autres postes de consommation (notamment la centrale thermoélectrique) générant ainsi des émissions de CO₂ sur ces postes, la recirculation des gaz sidérurgiques a en quelque sorte pour effet de concentrer les émissions au niveau des hauts fourneaux car l'utilisation du carbone (et donc fatallement sa conversion en CO₂) est désormais bien plus optimisée. C'est la raison pour laquelle les émissions de CO₂ au niveau des hauts fourneaux augmentent si fortement. À noter toutefois que toute l'électricité non produite par la centrale thermoélectrique grâce aux gaz sidérurgiques devra être remplacée par de l'électricité issue du réseau, ce qui a pour effet d'augmenter les émissions indirectes de scope 2 (non représentées sur la Figure 47).

³² La technologie « COREX » est un procédé de réduction dit par « smelting » et présenté comme une voie alternative au haut fourneau. En particulier, le procédé utilise directement le minerai de fer et le charbon en entrant sous forme de forme, à la place de l'aggloméré et du coke. Il court-circuite ainsi l'agglomération et la cokerie. Malgré les gains partiels de CO₂ qu'elle peut offrir, cette technologie n'a pas été modélisée car non pressentie dans les trajectoires de décarbonation des sites sidérurgiques français.

<i>Commodité</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur d'origine /t_{coke}</i>	<i>Nouvelle valeur /t_{coke}</i>
Coke	kWh	2491	1478
Gaz de cokerie	kWh	60	0
Gaz de haut fourneau (consommation)	kWh	375	256
Gaz de haut fourneau (production)	kWh	-1350	-384
Électricité	kWh	95	252
Oxygène	Nm3	38	215
Biocharbon pulvérisé	kWh	$1501 \cdot part_biocharbon_HF$	$1511 \cdot part_biocharbon_HF$
Charbon pulvérisé	kWh	$1501 \cdot (1 - part_biocharbon_HF)$	$1511 \cdot (1 - part_biocharbon_HF)$

Tableau 13: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.

<i>Commodité</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur d'origine /t_{fonte}</i>	<i>Nouvelle valeur /t_{fonte}</i>
Gaz de cokerie (consommation)	kWh	0,017	0,091
Gaz de haut fourneau	kWh	0,089	0,038

Tableau 14: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie de la cokerie.

<i>Commodité</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur d'origine /t_{coke}</i>	<i>Nouvelle valeur /t_{coke}</i>
Gaz de cokerie	kWh	295	245
Gaz de haut fourneau	kWh	17	8
Gaz réseau	kWh	43	102

Tableau 15: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du laminage à chaud.

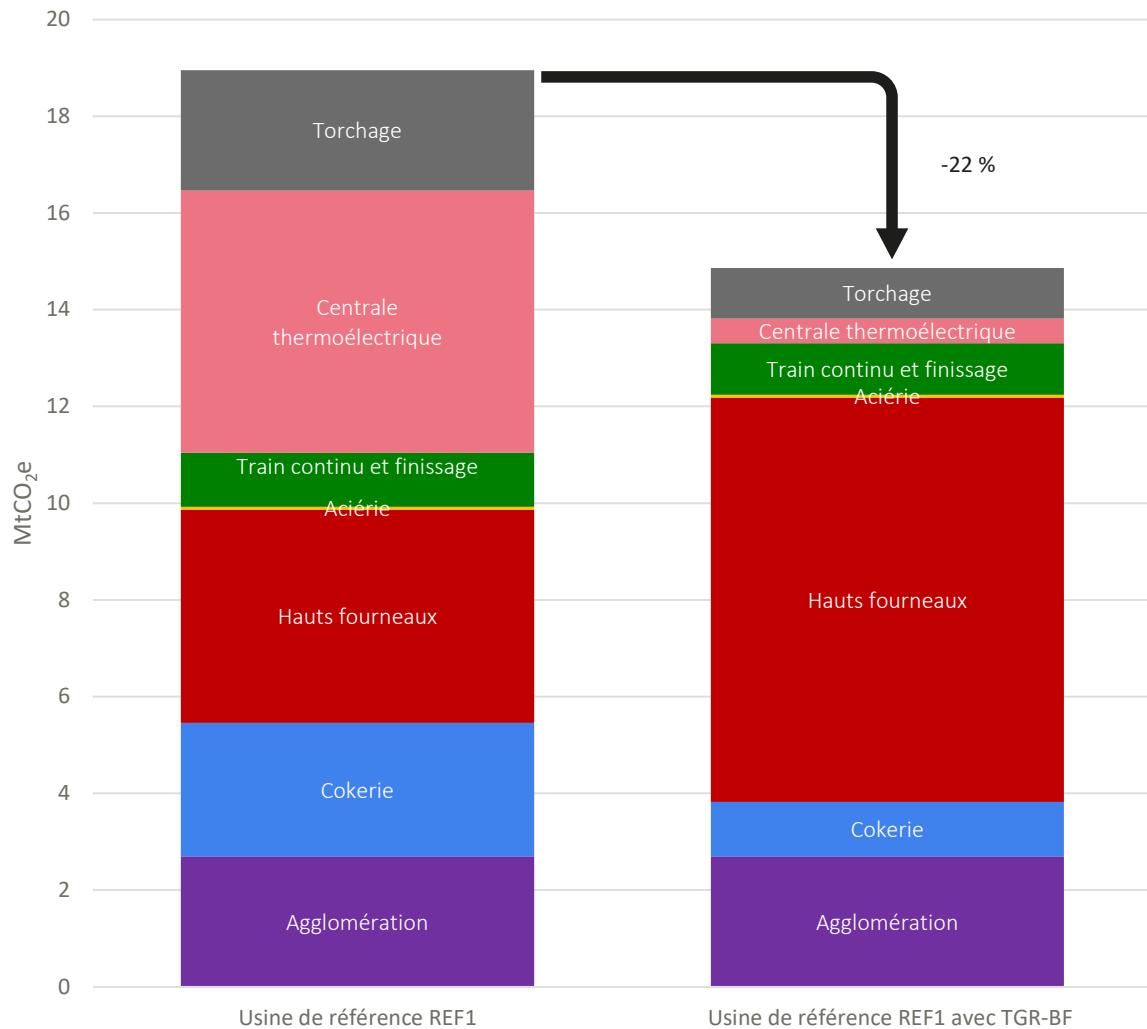


Figure 47: Usine de référence REF1 - Effet de la recirculation des gaz sidérurgiques sur les émissions de GES.

3.2.3.3.5. Injection de plastiques dans les hauts fourneaux

En tant que sources de carbone et d'hydrogène, des déchets plastiques peuvent être ajoutés en co-injection au charbon pulvérisé dans le haut fourneau. On parle alors de WPI, pour *Waste Plastic Injection*. En 2010, seuls certains hauts fourneaux en Autriche, en Allemagne et au Japon pratiquaient l'injection de plastiques. Les thermoplastiques sont la principale famille de plastiques qui peuvent être utilisés en co-injection dans le HF, essentiellement le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polyéthylène téréphthalate (PET) et le polystyrène (PS). Le polychlorure de vinyle (PVC) fait également partie des thermoplastiques utilisables, mais la présence de chlore y est problématique car il se transforme en grande partie en acide chlorhydrique qui, même si une partie est retirée dans le laitier, peut à terme corroder la tuyauterie et les équipements de traitement des gaz. C'est la raison pour laquelle l'injection de PVC est limitée à quelques pourcents.

L'injection de 1 kg de déchets plastiques peut remplacer environ 1,3 kg de charbon pulvérisé dans les hauts fourneaux de JFE Steel, au Japon, et environ 1 kg de pétrole lourd à Stahlwerke Bremen, en Allemagne. Cette utilisation du plastique qui semble plus efficace que le charbon pulvérisé s'explique par le fait que les déchets plastiques ont un pouvoir calorifique généralement supérieur, un taux de résidus (ou de cendres) plus faible et un contenu en carbone et en hydrogène plus élevé. Toutefois, le remplacement du coke par des déchets plastiques est limité à environ 30 %. Le coût élevé de la collecte et du traitement ainsi que la difficulté de mettre en place un approvisionnement fiable et de bonne qualité constituent les deux principaux freins à l'utilisation de déchets plastiques dans les hauts fourneaux [38].

Dans la mesure où la teneur en hydrogène est généralement plus élevée dans les déchets plastiques que dans le coke et le charbon d'injection (14-15 % pour le PE et le PP par exemple contre 4-5 % pour le charbon), leur utilisation entraîne dans la plupart des cas une baisse des émissions de CO₂ par tonne de fonte produite. Une ACV a estimé que le WPI pouvait permettre de réduire les émissions de l'ordre de 0,16 tCO₂/t_{fonte} [38] soit une baisse d'environ 10 % sur la base d'une empreinte carbone de 1,5 tCO₂/t_{fonte}. Parmi les différents types de déchets plastiques, il semblerait que le PE et le PP présentent le meilleur potentiel de réduction d'émissions [38].

Modélisation de l'injection de plastiques dans les hauts fourneaux

L'injection de plastiques dans les hauts fourneaux n'a pas été considérée dans la modélisation par manque de données techniques.

3.2.3.3.6. Charbon d'origine biosourcée

Le charbon pulvérisé dans le haut fourneau peut être remplacé par du charbon issu de biomasse, dit « biocharbon », de sorte que les émissions directes associées à l'injection de charbon deviennent biogéniques. Cette technique nécessite des unités de torréfaction qui convertissent des sources de biomasse (telles que des déchets de bois) en biocharbon par pyrolyse. La biomasse peut également être employée dans la cokerie pour la production de biocoke, comme combustible au niveau de l'agglomération ou encore comme source de carbone pour la recarburation de l'acier lors de la métallurgie en poche. Dans cette partie, il n'est question que de la substitution du charbon d'injection par du biocharbon car elle représente l'option la plus avancée techniquement. L'utilisation de biomasse pour la production de biocoke pose des défis techniques liés à la qualité et aux priorités mécaniques du coke obtenu [85].

L'utilisation de biomasse au haut fourneau est déjà largement employée au Brésil, qui produit 25 à 30 % de son acier à partir de biocharbon. Cependant, la production de biocharbon pour utilisation dans l'industrie de l'acier a entraîné de la déforestation au Brésil, impliquant notamment des émissions indirectes, avec peu d'efforts faits pour limiter ce problème [86].

D'après le centre de recherche finlandais VTT, 20 % du charbon pulvérisé peut être remplacé par du biocharbon aujourd'hui avec les techniques actuelles, potentiellement plus avec une modification des systèmes d'injection [87]. La limite technique vient de la teneur plus importante du biocharbon en phosphore et en éléments alcalins [85]. Toutefois, d'après E. Mousa et al. (2016) [88], le charbon pulvérisé pourrait en théorie être entièrement remplacé par du biocharbon.

Modélisation de l'injection de biocharbon

Dans la modélisation, il a été considéré que la totalité du charbon pulvérisé pouvait être remplacée par du biocharbon.

Le taux de biocharbon pulvérisé est modélisé par l'intermédiaire d'une variable de fonctionnement propre au haut fourneau (*part_biocharbon_HF* – voir Tableau 8). L'augmentation de ce taux au-delà de 0 % implique la mise en place d'unités de torréfaction. Celle-ci se matérialise par la prise en compte d'une dépense d'investissement, à hauteur de 690 EUR/t_{biocharbon.an}, basée sur le projet Torero [89] d'ArcelorMittal, qui vise à consommer 80 kt/an de biocharbon sur le site de Gent en Belgique.

3.2.3.4. Captage et stockage géologique du CO₂

Sur un site intégré, les sources de CO₂ sont essentiellement issus des gaz de haut fourneau (à une concentration d'environ 22 % de CO₂) et du convertisseur à oxygène (concentration d'environ 14 %) [90, p. 2].

Les défis du captage du CO₂ dans l'industrie de l'acier tiennent notamment à la multiplicité des sources de CO₂, qui sont distantes les unes des autres au sein du site intégré, ainsi qu'à la variabilité de composition des gaz sidérurgiques, avec, en particulier, des concentrations variables en CO₂. Dans une étude de l'IEAGHG (2013) [57], l'usine de référence de production d'acier qui a été modélisée présente 23 points d'émissions de CO₂. Ces sources d'émissions sont physiquement concentrées au niveau de l'usine de production d'énergie, qui valorise les gaz sidérurgiques issus des hauts fourneaux, de l'agglomération et de la cokerie (voir Figure 48).

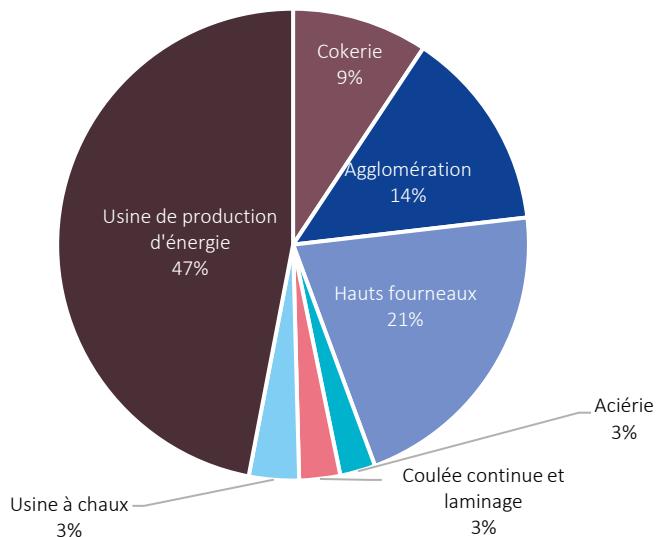


Figure 48: Origine des émissions annuelles de CO₂ sur le site intégré tel que modélisé par l'IEAGHG (2013) [57]

Plusieurs configurations ont été étudiées pour capter le CO₂ émis sur un site intégré. Avec une technologie de type postcombustion par solvant, le CO₂ peut être capté au niveau des cowpers qui servent à préchauffer le vent, au niveau de la chaudière qui produira la vapeur nécessaire pour combler la pénalité énergétique du captage, au niveau des réchauffeurs de la cokerie et au niveau des fours à chaux pour les sites intégrés qui en disposent [57]. Au final, seules les technologies de captage CO₂ par TGR-BF (pour « Top Gas Recycling Blast Furnace ») et sur le laminage ont été abordées notamment par manque de données techniques sur les autres options. Le captage du CO₂ par TGR-BF semble par ailleurs la voie la plus efficace car elle permet dans un premier temps d'optimiser le potentiel des agents réducteurs en entrée du haut fourneau. Comme expliqué dans la partie 3.2.3.4, la technologie a pour effet de concentrer les émissions de CO₂ au niveau du haut fourneau, raison pour laquelle les options de capter le CO₂ au niveau de la centrale thermoélectrique ou de la cokerie perdent de leur intérêt.

3.2.3.4.1. Captage du CO₂ par TGR-BF

Dans une configuration en recirculation des gaz sidérurgiques, une technologie de captage de type VPSA est utilisée pour éliminer le CO₂ au fur et à mesure. La technologie TSA (pour « Temperature Swing Adsorption » en anglais) a été étudiée par N. Jiang et al. (2020) [91] pour le captage du CO₂ mais s'est révélée plutôt inefficace comparée aux technologies VPSA et TVSA (pour « Temperature/Vacuum Swing Adsorption » en anglais) sur le plan de la productivité, de la consommation énergétique, de la pureté et du taux de captage du CO₂.

Ces technologies sont considérées comme matures et ont notamment déjà des applications pour la production d'oxygène à partir de l'air, pour la purification d'hydrogène et pour le captage du CO₂ [91]. Le captage du CO₂ par VPSA a déjà été expérimenté dans le cadre du projet ULCOS à Luleå, en Suède, dans une configuration avec recirculation des gaz de haut fourneau (abrégé TGR-BF pour « Top Gas Recycling Blast Furnace ») [92] dont la modélisation est détaillée en 3.2.3.4. Le VPSA se situerait au niveau de la brique « Captage du CO₂ » sur la Figure 45. Toutefois, celui-ci n'a été dimensionné que pour retirer une partie du CO₂ de manière à assurer le bon fonctionnement du recyclage des gaz sidérurgiques. Dans le gaz de sortie (« Tail gas » sur la Figure 45), le CO₂ est présent à une concentration de 87 % (le reste étant majoritairement du CO), ce qui est insuffisant pour le transport et de stockage. Pour cela, le CO₂ doit être concentré à plus de 95 % pour être transporté par canalisation et à plus de 99,9 % pour être transporté par bateau sous forme liquide [93]. Afin d'obtenir un flux de CO₂ qui

répond aux critères du transport et du stockage, des étapes supplémentaires de purification par cryogénie et de compression sont nécessaires [57], [92]. La cryogénie est une technique de captage adaptée aux flux avec une concentration élevée en CO₂[31].

Deux configurations pour la technologie de recirculation des gaz de haut fourneau TGR-BF ont été prises en compte dans la modélisation : (1) une technologie TGR-BF avec VPSA uniquement et sans transport et stockage du CO₂ et (2) une technologie TGR-BF avec VPSA, purification par cryogénie et compression pour le transport et stockage du CO₂. Cette dernière option peut être choisie après la première, cela ayant pour effet de rajouter des coûts d'investissement et d'augmenter les consommations énergétiques.

Les données présentées dans l'étude de l'IEAGHG (2013) [57] permettent d'estimer la surconsommation électrique nécessaire au captage par cryogénie et la compression du CO₂, une fois l'étape de captage par VPSA déjà effectuée. Deux configurations sont possibles : un captage par cryogénie dite « flash » et un captage par distillation cryogénique. Le premier cas est moins énergivore mais ne permet d'atteindre une concentration en CO₂ que de 96,3 %, insuffisante pour un transport par bateau, tandis que la distillation cryogénique permet d'obtenir une concentration en CO₂ proche de 100 % mais présente fatalement une consommation électrique plus élevée. Au regard des projets de hub CO₂ en cours de développement, il semble plus probable que le transport du CO₂ se ferait par bateau au niveau des zones CSC potentielles de Dunkerque et de Fos-sur-Mer (là où les deux principaux sites sidérurgiques français sont localisés). Pour être conforme avec le transport de CO₂ par bateau (qui nécessite d'être à une concentration supérieure à 99,9 %), il a été supposé que la dernière étape de captage se ferait à partir d'une technologie de distillation cryogénique.

Modélisation du captage de CO₂ par TGR-BF

Sur la base de l'étude de l'IEAGHG (2013) [57], il a été supposé que la consommation électrique supplémentaire serait de 210 kWh/tCO₂ pour le captage par cryogénie et de 195 kWh/tCO₂ pour sa compression à 110 bars, soit une consommation électrique totale de 405 kWh/tCO₂. Le captage de CO₂ adossé à la recirculation des gaz de haut fourneau a été modélisé via une modification de la description entrée-sortie du haut fourneau et via l'introduction d'un tableau entrée-sortie pour le procédé de captage.

Commodité	Unité	Valeur d'origine /t _{fronte}	Nouvelle valeur /t _{fronte}
CO ₂	tCO ₂	Bilan carbone	SELF + 0,6
CO ₂ capté	tCO ₂	-	-0,6

Tableau 16: Effet du captage de CO₂ après recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.

Commodité	Unité	Valeur d'origine /tCO ₂ capté	Nouvelle valeur /tCO ₂ capté
Électricité	kWh	-	-405

Tableau 17: Modélisation entrée-sortie du captage de CO₂ après recirculation des gaz de haut fourneau³³.

Le résultat de l'application d'une technologie TGR-BF avec capture du CO₂ est présenté sur la Figure 49. Une fois la première étape de recirculation des gaz de haut fourneau réalisée, les émissions du site se concentrent au niveau du poste haut fourneau comme expliqué dans la partie 3.2.3.3.4. Une fraction de ces émissions (indiquée en zone hachurée) correspond au flux de CO₂ qui est évacué en continu de la boucle de recirculation par une technologie VPSA. C'est ce flux qui peut être traité et envoyé pour transport et stockage. C'est ainsi tout autant d'émissions abattues pour le site. L'autre fraction des émissions du poste haut fourneau correspond aux émissions liées au préchauffage du vent par les cowpers qui ne rentrent pas dans le cadre de la boucle de recirculation. Au global, c'est ainsi plus de 50 % des émissions du site qui peuvent être abattues avec une combinaison des technologies de TGR-BF et capture du CO₂.

³³ La consommation d'électricité pour 1 tonne (positive) de CO₂ capté est négative car le flux de CO₂ capté prend par convention une valeur négative, étant donné qu'il s'agit d'un flux sortant et non entrant. La quantité d'électricité consommée est donc, en pratique, bien positive pour -1 t de CO₂ capté.

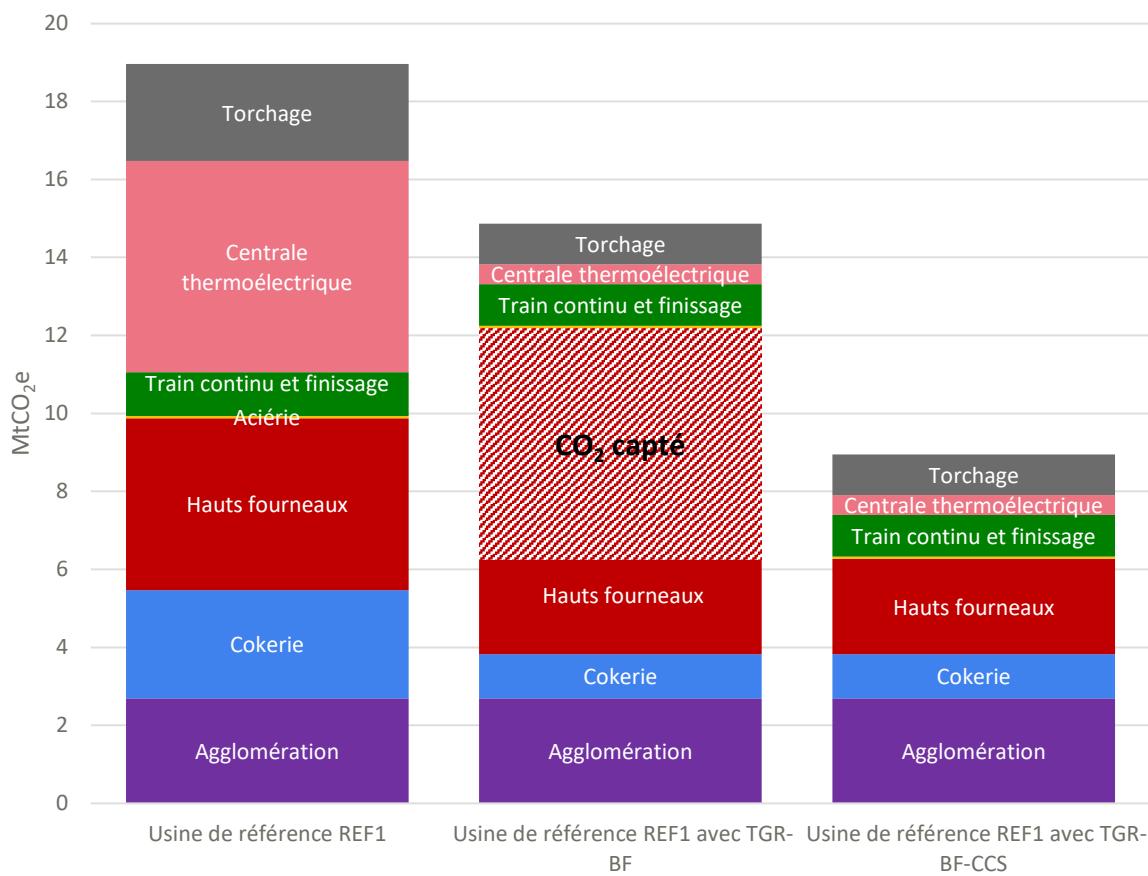


Figure 49: Usine de référence REF1 - Effet de la recirculation des gaz sidérurgiques avec et sans captage sur les émissions de GES.

3.3. Filière électrique

3.3.1. Procédés de la filière électrique

Une autre voie de production de l'acier par rapport à la voie hauts fourneaux est la production à base de ferraille dans le four électrique à arc (voie EAF). La principale source de fer est la ferraille, mais l'EAF peut également être exploité en utilisant du fer prétrétié (DRI / HBI) ou avec un mélange de DRI et de ferraille. La principale source d'énergie d'un site EAF est l'énergie électrique et également le gaz naturel dans une certaine mesure, surtout au niveau du laminage à chaud. Les ferrailles et autres sources de fer sont mises en fusion dans un four à arc électrique atteignant 1 600 °C. Pour éliminer les impuretés, de la chaux, du charbon, et de l'oxygène sont injectés. L'injection de gaz naturel est également courante pour améliorer les performances énergétiques du procédé et combler certaines zones dites « froides » au sein du four : l'électricité peut représenter jusqu'à 60 % des consommations d'énergie du four et l'énergie chimique (gaz naturel, charbon, oxygène), les 40 % restants [94]. Les fours à arc électrique ont généralement une capacité de production plus faible que les hauts fourneaux (quelques dizaines à un million de tonnes par an généralement).

Le four à arc électrique se compose essentiellement d'une cuve basculante garnie de réfractaires. Un panier de ferrailles, généralement complété avec des additifs comme du charbon, de la chaux et des ferroalliages, apporte la charge par-dessus le four. Lors de son fonctionnement, une coupole (aussi appelé le « toit ») à travers laquelle sont disposées une ou plusieurs électrodes en graphite, recouvre la cuve contenant la charge. Une forte tension est appliquée entre les électrodes et le métal de façon à faire jaillir un arc électrique et faire fondre le métal.

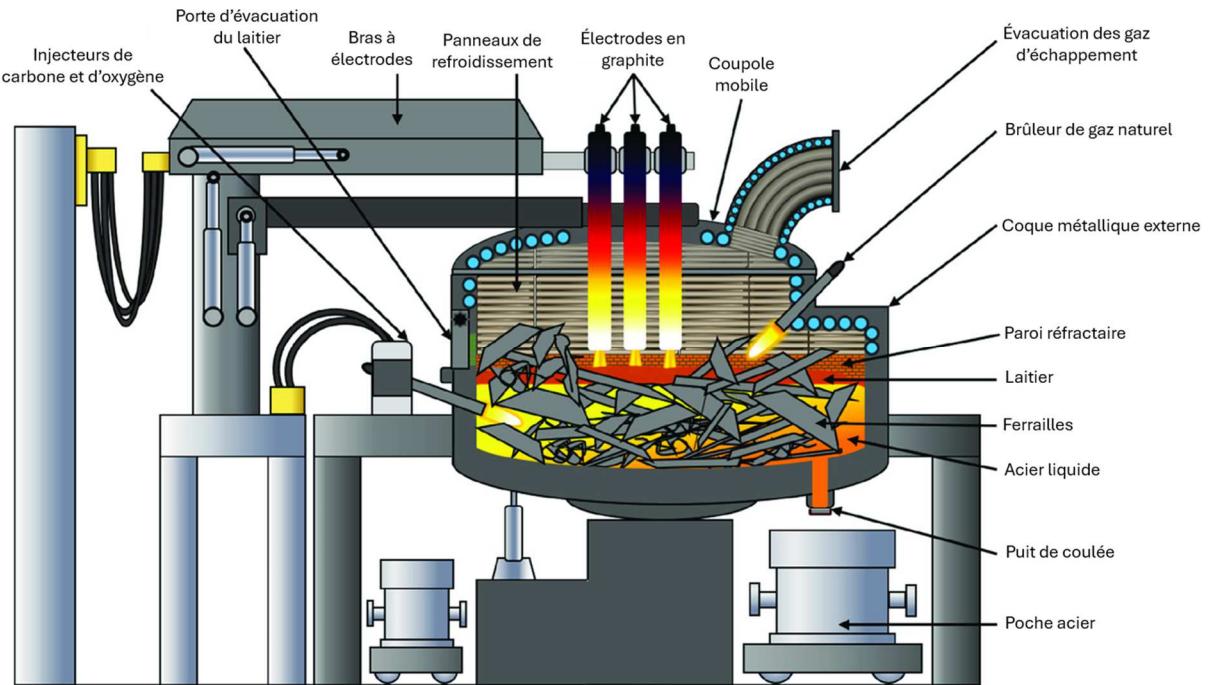


Figure 50: Schéma d'un four à arc électrique (adapté de [95]).

Une fois le métal en fusion, il est nécessaire d'en retirer certains éléments comme le carbone et le phosphore. Historiquement, la décarburation et la déphosphoration étaient obtenues par addition de minerai de fer mais elle a peu à peu été remplacée par un procédé d'insufflation d'oxygène dans le métal liquide à travers une lance pour provoquer une oxydation de ces éléments. L'oxygène permet également de retirer le silicium [21]. À présent, l'insufflation d'oxygène est aussi pratiquée pendant la phase de fusion afin de l'accélérer en brûlant le carbone apporté par la charge en le convertissant en CO et CO₂ (dans une proportion 90 % CO / 10 % CO₂ [96]) mais aussi pour former un laitier « moussant » qui protège les parois internes de la cuve des radiations de l'arc électrique, ce qui améliore le transfert d'énergie thermique dans le bain en fusion. Ce dernier peut aussi être brassé par injection d'un gaz inerte par le fond (argon ou azote par exemple), ce qui améliore les échanges thermiques dans le bain et l'équilibre métal-laitier [21], [97]. Le carbone permet également de réduire les oxydes de fer présents dans la charge (selon la réaction FeO + C → Fe + CO₂ [98]) et ainsi augmenter le rendement ferrique de la fusion. La présence d'éléments volatils dans le charbon a tendance à apporter de l'hydrogène au bain en fusion, lequel contribue à la réduction des oxydes de fer [98]. L'injection de sources de carbone fossile issues du charbon représente de l'ordre de 40 à 70 % des émissions directes de CO₂ d'un four à arc électrique. Le reste des émissions provient de la consommation des électrodes en graphite, de la décarbonatation du calcaire et de la dolomie utilisés pour la formation du laitier, et de l'usage de gaz naturel [99]. A la fin de chaque cycle, le laitier qui surnage l'acier liquide est séparé du métal par basculement du four dans un sens puis dans l'autre. Du fait de toutes les réactions listées précédemment, la fusion au four à arc électrique génère toujours en pratique quelques pertes matières : L. Yang et al. (2017) [96] donne une valeur de 1 044,69 kg de ferrailles par tonne d'acier liquide produit. Il est également possible pour lesaciéries électriques de consommer de la fonte ou du DRI. C'est d'ailleurs une manière pour certains sites qui en ont la possibilité de réduire les coûts de production en temps de tension sur la ferraille.

Intrant	Rôle
Ferrailles, fonte	Source de fer et de carbone
Chaux, dolomie	Constitution du laitier initial afin de séparer les impuretés
Charbon (anthracite)	Formation du laitier moussant pour protéger les parois internes du four et améliorer les transferts thermiques, réduction partielle des oxydes de fer
Gaz naturel	Complément d'énergie thermique, notamment au niveau des « zones froides »
Oxygène	Oxydation du carbone, du phosphore et du silicium
Ferroalliages	Désoxydation, désulfuration, mise au point de la composition

Tableau 18: Rôle des différents intrants du four à arc électrique.

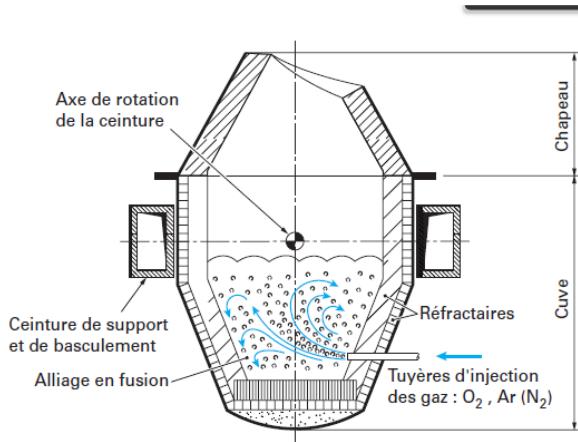


Figure 51: Chargement d'un four à arc électrique par un panier de ferrailles [21].

La consommation énergétique spécifique d'un site (soit la quantité d'énergie consommée par tonne d'acier produit) dépend fortement de son niveau de production : celle-ci peut varier du simple au double selon les fluctuations de production mensuelle. Dans la modélisation, ces variations n'ont pas été prises en compte : cela revient à supposer que les fluctuations mensuelles sont lissées au long de l'année.

Une fois le métal rendu à l'état liquide, la suite du traitement est similaire à la voie haut fourneau : l'acier subit des traitements en poche (métallurgie dite « secondaire »), puis il est coulé, généralement sous forme de blooms qui seront ensuite laminés pour former des produits longs (poutres, tubes, barres). En France, les aciéries électriques produisent deux grands types d'acier : les aciers « carbone » faiblement alliés et les aciers fortement alliés. C'est d'ailleurs au travers de deux usines de référence de ce type que les aciéries électriques ont été prises en compte dans la modélisation (voir partie 3.3.2). Les aciers carbone et autres faiblement alliés constituent l'essentiel de la production des fours à électrique en volume. Ils ne contiennent pas ou peu d'éléments d'alliages et sont élaborés grâce au type de ferrailles utilisées ainsi qu'au moment de l'affinage. Dans le cas où la charge est composée de 100 % de ferrailles, le taux de carbone contenu dans l'acier liquide est relativement faible. Pour des questions de productivité, les industriels ont tendance à abaisser la teneur en carbone dans le métal à environ 0,05 % lors de la fusion dans le four à arc électrique. En deçà de ce taux, les pertes ferriques par oxydation deviennent trop importantes [100].

Tout comme les aciers au carbone, l'élaboration des aciers inoxydables débute par la fusion de matières premières dans un four à arc électrique. La charge introduite est essentiellement constituée de ferrailles, de chutes d'acier et de ferroalliages. Contrairement aux aciers carbone, les aciers inoxydables nécessitent une très faible teneur en carbone (souvent inférieure à 0,03 %) et doivent parallèlement conserver une teneur élevée en chrome (typiquement de 17 à 18 %) ce qui requiert des procédés d'affinage particuliers [101]. Une fois le métal liquide issu du four à arc électrique, celui-ci doit donc subir une décarburation par soufflage d'oxygène. Toutefois, le chrome a également tendance à s'oxyder et celui-ci se retrouve perdu sous forme de Cr₂O₃ dans le laitier. Afin d'éviter cette réaction au risque de devoir rajouter du ferrochrome affiné dont le prix est très élevé, il est nécessaire de fortement favoriser la réaction d'oxydation du carbone ce qui peut être fait en réduisant la pression partielle d'oxyde de carbone. Pour se faire, il est possible de diluer le CO avec de l'oxygène et un autre gaz inert, typiquement de l'argon ou l'azote : c'est le principe du procédé AOD (pour « Argon Oxygen Decarburization », voir Figure 52) qui, avec ses dérivés, représente environ 75 % de la capacité mondiale. L'autre solution est de travailler sous vide ce qui a également pour effet de réduire la pression partielle du CO : c'est le principe du procédé VOD (pour « Vacuum Oxygen Decarburization », voir Figure 53) qui permet par ailleurs d'atteindre des teneurs en carbone encore plus faibles, de l'ordre de 0,005 %. La décarburation du métal en fusion est ensuite suivie d'une étape de désoxydation par ajout de ferrosilicium puis d'une étape de désulfuration par ajout de CaO qui, avec le soufre, viendra former du sulfure de calcium CaS avant d'être éliminé par le laitier.



Ar (N₂) : l'argon peut être (partiellement) remplacé par de l'azote en début de soufflage, mais la fin de l'affinage s'effectue généralement sous argon (d'où N₂ entre parenthèses)

Figure 52: Coupe schématique d'un convertisseur AOD [101].

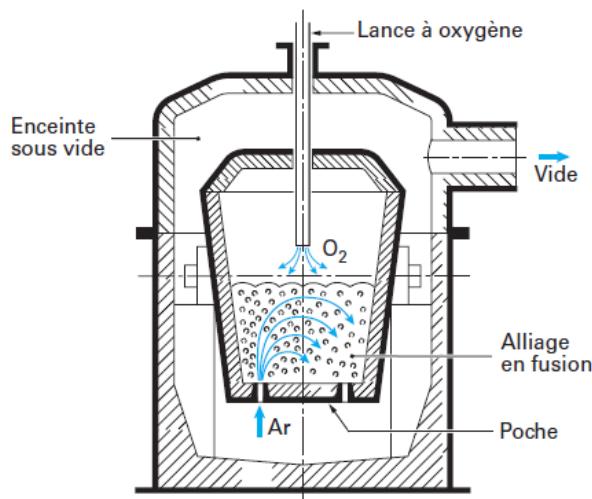


Figure 53: Coupe schématique d'un procédé VOD (pour « Vacuum Oxygen Decarburization ») [101].

3.3.2. Modélisation de la filière électrique

Il a été estimé que la capacité maximale de production d'acier liquide de l'ensemble des aciéries électriques françaises était de 6 Mt/an. Dans la modélisation, deux usines de référence ont été construites pour représenter la production française des aciéries électriques. Il a été supposé que la première usine EAF produit une gamme d'acières carbone et faiblement alliés (usine REF2-1, voir Figure 54) tandis que la seconde produit des aciers inox et fortement alliés (usine REF2-2, voir Figure 55). Les hypothèses relatives aux consommations énergétiques spécifiques et aux sources d'émissions de procédé sont détaillées dans les Tableau 19 et Tableau 20 pour l'usine REF2-1 et les Tableau 21 et Tableau 22 pour l'usine REF2-2. Ces hypothèses ont été faites sur la base de l'étude de l'ensemble des aciéries électriques françaises. Pour s'assurer de leur cohérence, les valeurs ont également été recroisées avec des sources issues de la littérature scientifique telles que L. Yang et al. (2017) [96], T. Echterhof (2021) [98] ou encore ESTEP (2021) [102]. En plus de ces caractéristiques techniques, il a été supposé que la consommation spécifique de ferraille serait de 1 050 kg_{ferraille}/t_{acier liquide} sur la base L. Yang et al. (2017) [96]. Cette valeur est commune aux deux usines de référence ainsi que pour les éventuels futurs fours à arc électrique couplés à un réacteur DRI.

Le choix de modéliser les aciéries électriques au travers de deux usines de référence et non une seule a été fait pour essentiellement pour deux raisons. Tout d'abord, il est possible de flétrir grossièrement les deux grandes catégories d'acières selon les applications de marché. En l'occurrence, les aciers carbone et faiblement alliés sont plutôt à destination du bâtiment et des infrastructures tandis que les aciers inox et fortement alliés ont des applications variées telles que l'aéronautique, les équipements industriels ou encore les biens d'équipement et de consommation. Ensuite, il existe une certaine homogénéité dans les procédés et les consommations spécifiques entre ces deux grandes catégories d'usines. Par exemple, la production d'acières inox et fortement alliés nécessite en général un procédé de type AOD ou VOD lors de la métallurgie secondaire ce qui n'est pas le cas pour les aciers carbone et faiblement alliés. La consommation d'éléments d'alliages est également plus

élevée. Pour ces deux raisons, il est apparu pertinent de segmenter la représentation des aciéries électriques en deux usines de référence.

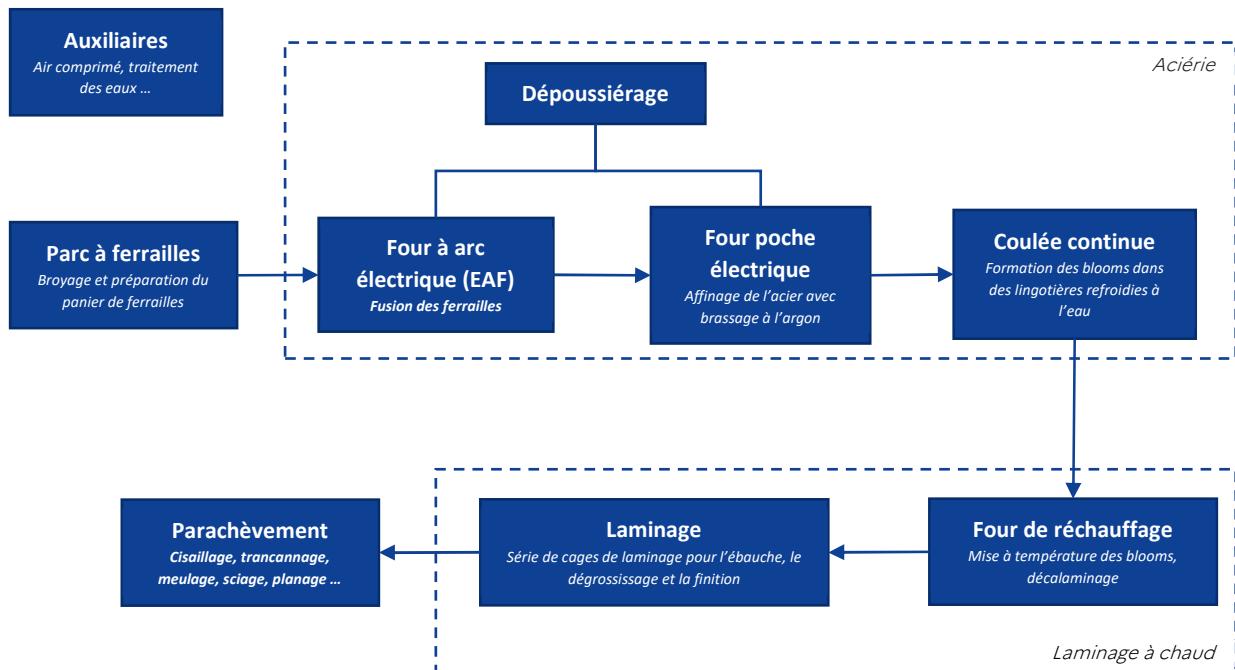


Figure 54: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés – Schéma de procédé.

Etape de procédé	Vecteur énergétique	Consommation spécifique
Four à arc électrique	Electricité	450 kWh/t _{acier liquide}
	Gaz naturel	50 kWh/t _{acier liquide}
	Oxygène	70 kWh/t _{acier liquide} (soit 18,2 Nm ³ /t _{acier liquide}) ³⁴
Four poche électrique	Electricité	20 kWh/t _{acier liquide}
	Gaz naturel	30 kWh/t _{acier liquide}
Dépoussiérage	Electricité	50 kWh/t _{acier liquide}
Four de réchauffage	Gaz naturel	300 kWh/t _{acier laminé}
Laminage	Electricité	100 kWh/t _{acier laminé}
Auxiliaires	Electricité	75 kWh/t _{acier liquide}

Tableau 19: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés - Consommations énergétiques spécifiques.

Source d'émissions de procédé	Intensité GES
Anthracite, coke et autres sources de carbone (graphite, pneumatiques ..)	35 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Consommation des électrodes en graphite	5 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Chaux et dolomie pour la formation du laitier	2 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Métaux d'addition carburé (ferrosilicium, ferromanganèse ...)	0 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}

Tableau 20: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés – Sources d'émissions de procédé.

³⁴ Sur la base d'un coefficient d'équivalence de 3,85 kWh/Nm³.

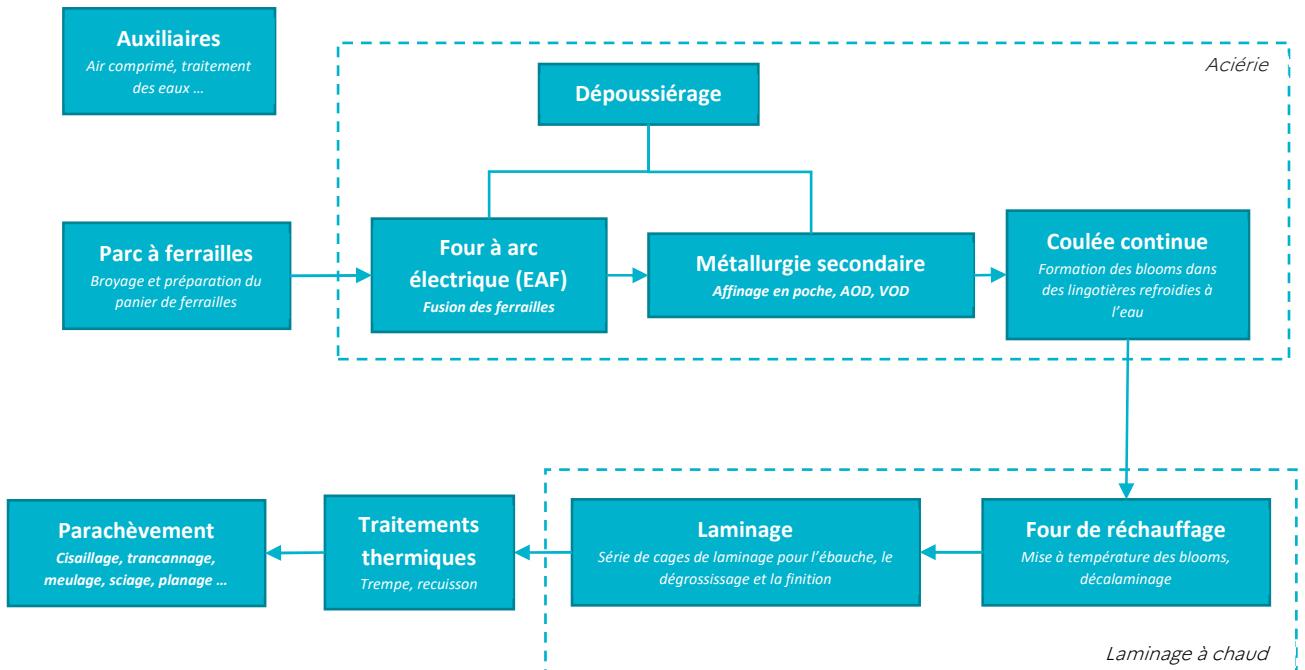


Figure 55: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés – Schéma de procédé.

Etape de procédé	Vecteur énergétique	Consommation spécifique
Four à arc électrique	Electricité	500 kWh/t _{acier liquide}
	Gaz naturel	60 kWh/t _{acier liquide}
	Oxygène	70 kWh/t _{acier liquide} (soit 18,2 Nm ³ /t _{acier liquide}) ³⁵
Métallurgie secondaire	Electricité	100 kWh/t _{acier liquide}
	Gaz naturel	100 kWh/t _{acier liquide}
Dépoussiérage	Electricité	50 kWh/t _{acier liquide}
Four de réchauffage	Gaz naturel	600 kWh/t _{acier laminé}
Laminage	Electricité	200 kWh/t _{acier laminé}
	Gaz naturel	250 kWh/t _{acier laminé}
Traitements thermiques	Electricité	300 kWh/t _{acier laminé}
	Gaz naturel	75 kWh/t _{acier liquide}

Tableau 21: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés - Consommations énergétiques spécifiques.

Source d'émissions de procédé	Intensité GES
Anthracite, coke et autres sources de carbone (graphite, pneumatiques ..)	35 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Consommation des électrodes en graphite	15 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Chaux et dolomie pour la formation du laitier	2 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}
Métaux d'addition carburé (ferrosilicium, ferromanganèse ...)	20 kgCO ₂ e/t _{acier liquide}

Tableau 22: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés – Sources d'émissions de procédé.

³⁵ Sur la base d'un coefficient d'équivalence de 3,85 kWh/Nm³.

3.3.3. Technologies de décarbonation de la filière électrique

3.3.3.1. Traitement et nettoyage des ferrailles de moins bonne qualité

La ferraille de bonne qualité, et notamment l'absence de matériaux inertes, permet de diminuer la quantité d'énergie déployée dans le four à arc électrique pour mettre en fusion les intrants. Après plusieurs échanges avec les industriels, il a été convenu que le gain d'efficacité énergétique maximum serait de 10 % sur le four à arc électrique soit environ 50 kWh/t_{acier} liquide.

3.3.3.2. Efficacité énergétique

3.3.3.2.1. Digitalisation

La quantité importante de paramètres à gérer en temps réel dans un four à arc électrique a rendu le contrôle par ordinateur quasi-nécessaire. Bien que déjà en place dans de nombreuses aciéries, il a été estimé que la gestion optimisée des fours électriques par calculateur permettrait une économie d'électricité de l'ordre de 15 kWh/t_{acier} liquide.

3.3.3.2.2. Brassage électromagnétique

La circulation d'un courant électrique basse fréquence dans les enroulements du brasseur produit un champ magnétique progressif qui pénètre par le bas du four et met en mouvement l'acier liquide. Les essais ont montré que le brassage électromagnétique permettait d'améliorer le transfert thermique, la productivité et le rendement métal [103]. D'après la bibliographie, cette technologie permet de réduire l'apport énergétique de 14 kWh/t_{acier} liquide, principalement sous la forme d'énergie chimique (gaz naturel, carbone et oxygène). Elle permet également de réduire de 4 à 6 % la consommation d'électrode [103].

3.3.3.2.3. Préchauffage de la ferraille

La chaleur fatale issue des fumées du four peut être utilisée pour préchauffer la ferraille avant son entrée dans le four à arc électrique à une température comprise entre 300 et 600 °C [104]. Il est estimé qu'environ 20 % de l'énergie apportée au four (sous forme électrique ou chimique) est perdue en chaleur dans les gaz de combustion [105]. La récupération de cette chaleur représente donc une source importante d'efficacité énergétique si elle n'est pas déjà mise en place. Le préchauffage des ferrailles est une technique largement répandue au Japon et de plus en plus également aux Etats-Unis. Elle permet par ailleurs d'améliorer la productivité en réduisant le temps de coulée de 8 à 10 minutes [106]. Il existe plusieurs techniques de récupération de chaleur issue des fumées comme la récupération par des gaines jusqu'au panier de chargement des ferrailles ou encore l'utilisation d'un four à cuve situé au-dessus du four à arc électrique. La technique la plus efficace est probablement le préchauffage continu dans lequel les ferrailles sont préchauffées à contre-courant en continu sur un convoyeur par les fumées s'échappant du four (Figure 56) [104].

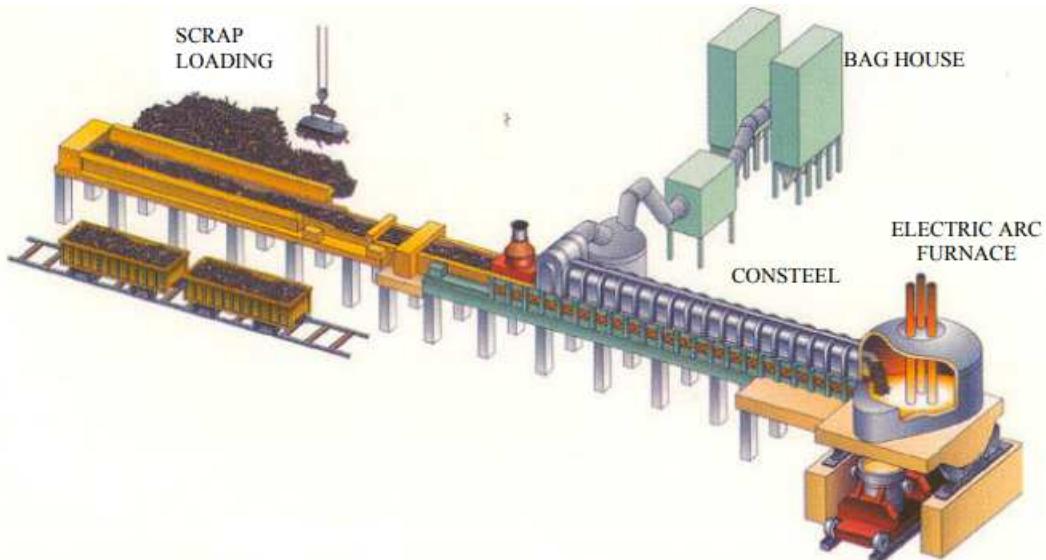


Figure 56 : Description schématique du procédé Consteel® [104].

Certaines installations de ce type ont fonctionné en France mais ont dû être arrêtées car cette technologie a notamment pour effet de générer des émissions de polluants et autres nuisances environnementales comme des composés organiques volatils (COV), des dioxines ou des furanes [106], [107]. Ces émissions surviennent notamment du fait d'un préchauffage de la charge

à une température relativement faible et cela nécessiterait des systèmes de traitement des gaz complexes et coûteux à mettre en œuvre. Pour ces raisons, la profession ne voit pas un grand avenir pour ce type de préchauffage en France. Toutefois, il faut noter qu'en 2012, il y avait 99 systèmes de préchauffage de ferraille en fonctionnement en Europe [105]. Aujourd'hui, le procédé considéré comme mature [108] repose principalement sur quatre technologies : les procédés Comelt, Twin Shell, Shaft ou Consteel®. Cette dernière technologie Consteel® est notamment utilisée par le groupe CELSA dans une usine norvégienne [109]. En mars 2023, l'entreprise Tenova a annoncé qu'elle allait fournir un nouveau four à arc électrique équipé d'un système de préchauffage Consteel® sur l'usine Tenaris de Campana en Argentine pour une capacité de production de 950 kt/an [110]. Le four sera également équipé d'un système de brassage électromagnétique de type Consteerrer® développé en partenariat avec l'entreprise ABB (voir partie 3.3.3.2.2). En comparaison avec la consommation électrique spécifique du four à arc électrique, qui est fixée entre 450 et 500 kWh/t_{acier} dans la modélisation, la littérature indique que le procédé Consteel® permet d'atteindre une consommation de l'ordre de 369 à 391 kWh/t_{acier} [111].

L'économie d'électricité engendrée par cette technique est estimée à 25 kWh/tacier liquide soit environ 5 % de la consommation des fours à arc électrique. En plus du gain énergétique, le préchauffage des ferrailles permet d'améliorer la productivité de 33 %, de réduire la consommation d'électrode de 40 % et de réduire les émissions de poussières [106]. A noter que la mise en place de cette technologie permet en théorie d'améliorer l'efficacité énergétique et la rentabilité des sites mais ne permet pas de réduire les émissions directes de CO₂ (ou très peu, via une baisse de la consommation des électrodes). En matière de coût, N. Pardo et al. (2012) [105] estime un montant d'investissement de 2,3 MEUR pour la mise en place de cette technologie sur une aciéries électrique d'une capacité de 500 kt_{acier}/an soit un coût de 4,6 EUR/t_{acier}.an.

3.3.3.2.4. Amélioration de l'étanchéité du four électrique

Cette technique consiste à disposer un couvercle étanche sur le four à arc pour réduire les pertes thermiques par les fumées et limiter les entrées d'air. Il a été estimé que cette technique permettrait un gain de l'ordre de 20 kWh/t_{acier} liquide sur la consommation électrique.

3.3.3.2.5. Brûleurs régénératifs

Un brûleur régénératif (Figure 57) est une technologie de combustion qui existe dans le secteur de la métallurgie et dont le principe est de préchauffer l'air de combustion à l'aide des gaz chauds d'exhaure. Le préchauffage de l'air permet de valoriser la chaleur contenue dans les gaz de sortie et donc de considérablement améliorer l'efficacité énergétique du four. Le brûleur régénératif est constitué d'une enceinte de combustion alimentée en chaleur par deux brûleurs fonctionnant de manière alternée : lorsque le premier brûleur fonctionne, les gaz de combustion s'échappent par l'orifice du second et la chaleur qu'ils contiennent est transférée à un matériau réfractaire (généralement des billes d'alumine en céramique [112]). Au cycle suivant, le second brûleur se met en marche tandis que son air de combustion est préchauffé avec la chaleur relâchée par le matériau réfractaire. Le rôle de chacun des brûleurs s'inverse à chaque cycle, servant alternativement de brûleur et de cheminée [112], [113].

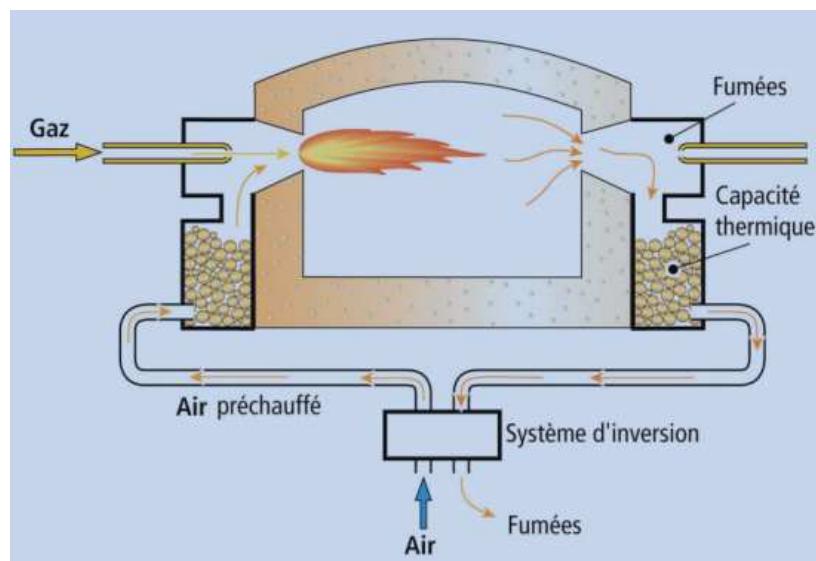


Figure 57 : Schéma de fonctionnement d'un brûleur régénératif [113].

Le brûleur régénératif est considéré comme une version améliorée du brûleur récupératif dont le principe de fonctionnement est sensiblement le même [112]. Il est estimé qu'un tel système de récupération parvient à valoriser entre 80 et 85 % de l'énergie entrante en chaleur « utile » ce qui permet de réduire la consommation énergétique du four de 40 à 50 % par

rapport à un système classique de brûleur à air froid [113]. Ces brûleurs régénératifs ne sont pas particulièrement limités en capacité ou puissance contrairement à certains fours électriques. Ils demandent néanmoins plus d'espace pour l'intégration des bacs de réfractaire à proximité de l'enceinte [113]. Ce type d'équipement est par ailleurs éligible aux Certificats d'Economie d'Energie³⁶.

3.3.3.2.6. Brûleurs oxy-fuel

Le principe d'un brûleur oxy-fuel est d'enrichir l'air de combustion en oxygène ce qui présente plusieurs avantages. Cela permet surtout de ne pas chauffer « inutilement » les autres composants de l'air qui ne participent pas à la réaction, notamment l'azote. Ensuite, dans les gaz de combustion, la chaleur radiante vient principalement des molécules de CO₂ et de H₂O ce qui, lorsqu'elles sont présentes en très forte concentration comme dans le cas d'une combustion oxy-fuel, permet de maximiser le transfert de chaleur [114]. Ces brûleurs permettent de réduire la consommation énergétique de 30 à 45 % et les émissions de NOx de 60 à 90 % par rapport à des brûleurs à air froid [115]. J. von Schéele (2010) [114] rapporte même un gain d'efficacité de 50 %.

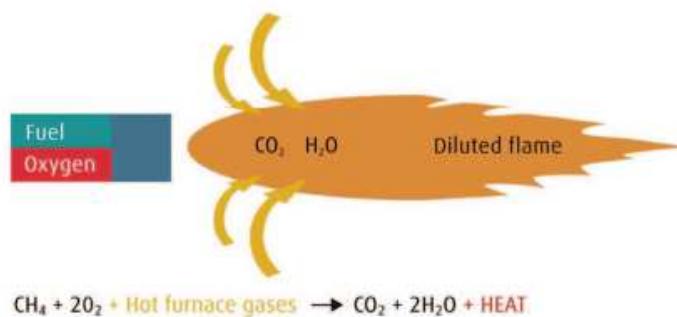


Figure 58 : Schéma d'une combustion oxyfuel [114].

Les brûleurs à gaz naturel présents dans les fours à arc électriques qui servent au préchauffage des zones froides présentes entre les électrodes sont généralement des brûleurs oxy-fuel. C'est en tous cas l'hypothèse faite dans la modélisation du parc industriel français. Toutefois, la technologie oxy-fuel peut également être équipée pour le préchauffage des poches ainsi que pour le réchauffage des semi-produits lors de l'étape de transformation. Il a été fait l'hypothèse que la mise en place de brûleurs oxy-fuel pour le préchauffage des poches permettait de réduire la consommation de gaz naturel de 35 % par rapport à des brûleurs à air froid. En matière de coût, N. Pardo et al. (2012) [105], propose un montant d'investissement de 2,8 MEUR pour une usine d'une capacité de 500 kt_{acier}/an soit un coût unitaire de 5,6 EUR/t_{acier}.an.

3.3.3.2.7. Four à arc électrique à courant continu

Traditionnellement, le four à arc est alimenté en courant alternatif (dit « AC ») : ce système fonctionne en triphasé et la coupole est traversée par trois électrodes en graphite. Depuis les années 1990, le four à arc électrique alimenté en courant continu (dit « DC », voir Figure 59) a gagné en intérêt dans le monde pour plusieurs raisons [97] :

- Il provoque moins de perturbations électriques (de « flicker »).
- Il génère moins de bruit.
- Il permet de réduire la consommation de l'électrode de graphite
- Il permet une légère augmentation de la productivité et de l'efficacité énergétique.

³⁶ Fiche standard [IND-UT-118](#)

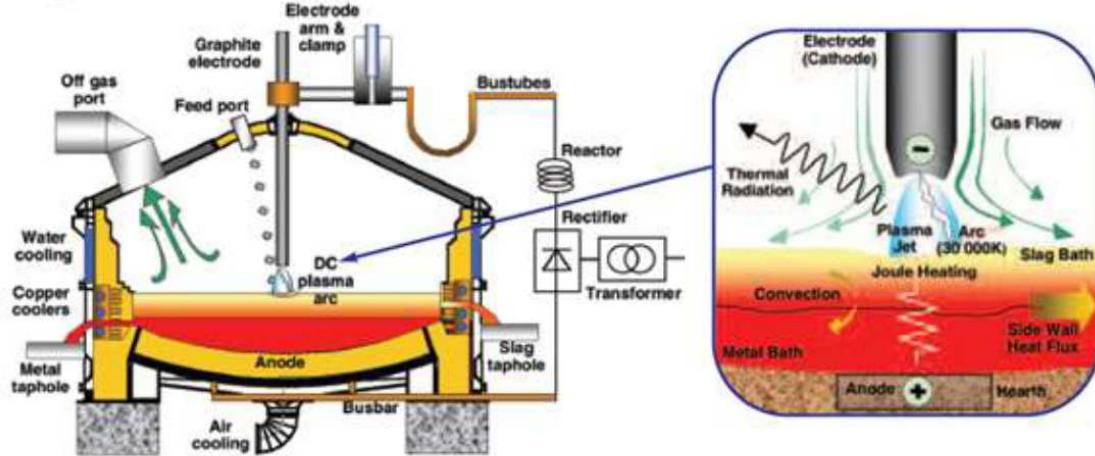


Figure 59 : Schéma d'un four à arc électrique DC alimenté en courant continu [116].

Contrairement aux fours à arc à courant alternatif qui équipent l'ensemble des aciéries électriques françaises, les fours à arc à courant continu fonctionnent avec une seule électrode qui améliore la stabilité de l'arc et le rendement de l'opération. Il a été estimé que la mise en place de cette technologie pourrait permettre un gain en efficacité électrique d'environ 70 kWh/t_{acier liquide}.

3.3.3.3. Electrification

3.3.3.3.1. Four à induction

Sous l'effet d'un champ magnétique, les produits métalliques peuvent être chauffés par l'action d'un courant induit. Lors de la première transformation de l'acier, la technique de l'induction peut être utilisée au moment du réchauffage des demi-produits avant le laminage, le forgeage ou encore pour des éventuels traitements thermiques (recuit, durcissement par trempe) [86]. Au niveau de ces étapes supposées alimentées par du gaz naturel dans la modélisation, il a été estimé que la consommation de 1 kWh de gaz naturel peut être substitué par 0,75 kWh d'électricité après passage à l'induction. Le montant des investissements pour l'acquisition et l'intégration d'un nouveau four à induction semble toutefois élevé. Sur la base d'une estimation interne ADEME, une hypothèse de coût d'investissement de 500 EUR/t_{acier.an} a été prise.

3.3.3.3.2. Résistances électriques

L'utilisation de résistances électriques pour le réchauffage des demi-produits constitue une technologie de décarbonation au sens où elle permet de substituer du gaz naturel. C'est une technique de chauffage connue depuis plus de 80 ans [117]. La consommation spécifique d'électricité pour un four de réchauffage fonctionnant à l'électricité est d'environ 275 kWh/t_{acier} (ce qui correspond à une efficacité de conversion de 85 %) contre 350 à 390 kWh/t_{acier} typiquement pour des fours à gaz [118]. Contrairement au passage à l'induction qui nécessite à priori de changer l'ensemble du four gaz, l'électrification par résistance électrique peut se faire en plusieurs étapes par des modifications sur le four de réchauffage gaz existant, entraînant ainsi des coûts d'investissement bien plus faibles. Parmi les matériaux résistifs étudiés, les résistances en MoSi₂ du type SuperKanthal semblent être bien adaptées pour le réchauffage de produits en acier [117].

Sur la base d'une estimation interne ADEME, une hypothèse de coût d'investissement de 30 EUR/t_{acier.an} a été retenue. Cette hypothèse correspond au coût de l'électrification d'un four de réchauffage par résistances électriques à 70 % par rétrofit d'un four gaz existant. Autrement dit, encore 30 % de l'énergie reste fournie par du gaz (pour atteindre les derniers niveaux de température).

3.3.3.3.3. Pompes à vide pour VOD

Pour l'acier inox, le remplacement du mécanisme de production de vide pour les systèmes de décarburation VOD (Vacuum Oxygen Decarburising) permet d'éviter des consommations de vapeur (et donc de gaz naturel). Il a été fait l'hypothèse que l'électrification du procédé de dégazage VOD permettrait d'économiser 40 kWh/t_{acier liquide} de gaz naturel au niveau de l'étape « métallurgie secondaire » et que cela entraînerait parallèlement une consommation électrique supplémentaire de 2 kWh/t_{acier liquide}. Les OPEX non liés aux consommations d'énergie (autres intrants, utilities, maintenance) sont plus faibles dans le cas de la pompe à vide.

3.3.3.3.4. Combustion directe d'hydrogène

Dans une acierie électrique, la combustion directe d'hydrogène en substitution du gaz naturel peut être envisagée essentiellement pour le préchauffage des poches, pour le réchauffage des semi-produits avant leur transformation ou pour les fours de traitement thermique. En 2020, l'aciériste suédois Ovako, en collaboration avec l'équipementier Linde, aurait testé avec succès le réchauffage de lingots par combustion d'hydrogène dans des fours pits sans affecter la qualité de l'acier [119], [120].

Il a été supposé dans la modélisation que la combustion directe d'hydrogène serait appliquée au préchauffage des poches (qui semble difficilement électrifiable directement) ainsi qu'aux derniers niveaux de température au sein des fours de réchauffage. Sur la base de l'examen de données de projets ADEME, une hypothèse de coût d'investissement de 30 EUR/t_{acier.an} a été retenue pour le rétrofit complet de brûleurs gaz vers des brûleurs H₂. Ce coût comprend les capacités d'électrolyse H₂ qui représentent d'ailleurs l'essentiel des coûts d'équipements associés.

3.3.3.4. CCUS

3.3.3.4.1. Captage et stockage du CO₂

A ce jour, le captage et le stockage du carbone sur les acieries électriques n'a quasiment pas été étudié dans la littérature scientifique, la majorité des travaux se focalisant sur le captage du CO₂ issu des hauts fourneaux. Toutefois, il faut noter que la technique semble théoriquement possible, à condition évidemment de pouvoir avoir accès à une zone de stockage. D'après D. E. Wiley et al. (2011) [121], le CO₂ contenu dans les fumées émises par un four à arc électrique (« mini mill ») se trouve à une concentration de 40 %, le reste étant essentiellement composé de N₂ à 56 %. A noter que ces chiffres ont été obtenus sur la base de calculs et non sur la base de mesures. Une telle concentration peut qualifier le procédé pour la mise en place d'une brique de captage. A travers une étude expérimentale, K. Dong et al. (2015) [122] a mesuré que la concentration en CO₂ dans les fumées issues du four d'un four arc électrique était comprise entre 24 et 28 % pendant la phase de fusion de l'acier et qu'elle était comprise entre 30 et 39 % pendant la phase d'oxydation. Le coût de captage du CO₂ sur un four à arc électrique a été estimé à 250 AUD/tCO₂ d'après D. E. Wiley et al. (2011) [121] soit environ 170 EUR/tCO₂³⁷.

3.3.3.4.2. Recarbonatation des laitiers

Les laitiers sidérurgiques sont des produits alcalins riches en oxydes de calcium (CaO) et en oxydes de magnésium (MgO) ce qui les rend potentiellement réactifs avec le dioxyde de carbone. La séquestration de CO₂ dans les laitiers permet de les rendre plus stables et favorisent leur utilisation dans différentes applications. Plusieurs paramètres ont une influence sur le processus de recarbonatation des laitiers. Une température trop élevée, par exemple, a tendance à diminuer l'efficacité de la réaction tandis qu'une granulométrie fine du laitier favorise la diffusion et la séquestration du CO₂ [123]. S. Kombathula (2020) [123] a testé la recarbonatation d'un laitier de four à arc électrique de composition standard à l'échelle laboratoire. Dans les meilleures conditions possibles, le taux de séquestration maximal obtenu était de 53 kgCO₂e/t_{laitier}. Sachant que la production de laitier de four à arc électrique s'élève à environ 126 kg/t_{acier liquide}, un taux de captage maximal de 53 * 126 = 6,7 kgCO₂e/t_{acier liquide} peut être envisagé. En comparaison, le taux d'émissions directes s'élève à environ 70 kgCO₂e/t_{acier liquide} dans la modélisation (pour la partie « acierie » uniquement).

Il est également possible de recarbonater une partie des poussières émises lors de la fusion des ferrailles, celles-ci étant riches en CaO. A une échelle laboratoire, M. H. El-Naas et al. (2015) [124] a obtenu un taux de séquestration de 0,657 kgCO₂ par kilogramme de poussière et un taux de carbonatation maximal de 42,5 %. Ne disposant pas d'informations supplémentaires, ce levier de décarbonation n'a pas été pris en compte.

3.3.3.1. Changement d'agent réducteur

3.3.3.1.1. Utilisation de biomasse

L'utilisation de carbone issu de biomasse en substitution du charbon dans les fours à arc électrique fait actuellement l'objet de recherches mais également d'essais à l'échelle industrielle. Différentes sources de biomasse ont été étudiées telles que le biocharbon, des copeaux de bois, des cosses de noix de palmier, des graines de citrouille encore des noyaux d'olives [98].

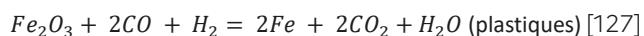
La principale piste étudiée pour substituer du charbon dans l'EAF reste le biocharbon préparé à partir de sources de biomasse. Celui-ci est en fait plus réactif que le charbon, d'où la nécessité de le stabiliser en le conditionnant sous forme de briquettes. Il peut être techniquement envisagé de substituer jusqu'à 100 % du charbon par du biocharbon avec un taux de substitution de 1,5 tonne de biocharbon pour une tonne de charbon [125]. La raison à cela est que la biomasse (qui a un taux de matières

³⁷ Hypothèse taux de change : 1 EUR = 1,5 AUD

volatiles plus important) est bien moins efficace que le charbon pour carburer l'acier liquide. Environ 55-60 % du carbone contenu dans le biocharbon n'est pas dissout dans le bain liquide mais se retrouve à l'état gazeux.

3.3.3.1.2. Utilisation de déchets organiques

Tout comme les hauts fourneaux, les déchets contenant du carbone comme des plastiques ou des pneumatiques peuvent être utilisés dans le four à arc électrique en remplacement du coke et du charbon. Sur certains sites, il s'agit d'ailleurs d'une pratique industrielle standard, du moins à des taux de substitution limités. Le chargement de déchets plastiques dans des paniers à ferrailles pour fusion dans un EAF est d'ailleurs considérée comme une technologie de TRL 9 [126]. Il a été montré expérimentalement que l'injection de plastique avait pour effet d'accélérer la formation du laitier moussant permettant ainsi d'améliorer la productivité et l'efficacité énergétique du procédé [111]. La consommation d'électricité serait réduite de 12 kWh/tonne de plastique chargée [111], [127]. Dans un haut fourneau, il est estimé que 1 kg de plastique PE pouvait remplacer 0,75 kg de coke pour une substitution maximale du coke de 30 %. D'après des échanges avec des industriels, il semblerait déjà techniquement possible d'atteindre un taux de substitution de 50 % et c'est également la conclusion à laquelle parvient F. Cirilli et al. (2022) [128] dans une étude expérimentale. Cette dernière étude montre par ailleurs que l'utilisation de 1 kg de plastique permet de substituer 1,13 kg d'anthracite dans l'EAF. Le dichlore contenu dans les plastiques peut être neutralisé par la chaux. Par ailleurs, le taux d'hydrogène est plus élevé que dans le coke et participe ainsi à la réduction des oxydes de fer en substitution partielle du carbone (voir équations ci-dessous).



En Europe, le projet OnlyPlastic [129] coordonné par le groupe italien RINA Consulting, a pour objectif d'étudier la substitution de l'intégralité des sources de carbone fossile traditionnellement utilisées dans un EAF (anthracite, coke) par des polymères densifiés issus de déchets plastiques. L'injection de plastiques en substitution du charbon a été modélisée sur la base des résultats de l'étude F. Cirilli et al. (2022) [128]. En l'occurrence, il a été fait l'hypothèse que les déchets plastiques utilisés avaient un PCI de 32 MJ/kg et un facteur d'émission de 0,65 kC/kg_{plastique} (soit 2 383 kgCO₂/t_{plastique}). Le ratio de substitution retenu est de 1 kg de plastique permet de substituer 1,13 kg d'anthracite et le taux de substitution maximal a été fixé à 50 %. Pour les pneumatiques, 1,7 kg sont nécessaires pour remplacer 1 kg d'anthracite. Le caoutchouc naturel qui compose en partie les pneumatiques et qui contient du carbone biogénique contribue à réduire les émissions de carbone fossile issues du procédé [127].

3.4. Filière de réduction directe

La filière de production d'acier par réduction directe (qui sera abrégée par « voie DRI-EAF » par la suite) fonctionne aujourd'hui essentiellement sur des procédés au gaz naturel. L'utilisation de l'hydrogène, qui se substitue au gaz naturel pour décarboner l'acier, fait l'objet de recherche et développement et approche désormais du stade industriel et commercial. Il s'agit par ailleurs de la technologie indirectement désignée lorsqu'il est question « d'acier à l'hydrogène ». Cette partie vise à décrire en détail le fonctionnement du procédé et des réactions en jeu en allant de la configuration actuelle avec 100 % de gaz naturel puis jusqu'à atteindre un fonctionnement 100 % H₂. À noter que, dans la modélisation, la voie DRI-EAF est traitée comme une usine de référence et non pas comme un levier de décarbonation qui viendrait s'activer sur une usine existante (voir partie 3.4.2).

3.4.1. Procédés de filière de réduction directe

3.4.1.1. Procédés conventionnels

Dans le procédé dit de « réduction directe », le minerai de fer est réduit à l'état solide pour obtenir une éponge de fer (fer primaire solide) communément appelée « DRI » - pour *Direct Reduced Iron* en anglais. Le DRI peut ensuite être utilisé dans un four à arc électrique, dans un convertisseur à oxygène ou bien aussi directement dans un haut fourneau. Une fois l'éponge de fer obtenue, elle peut être compactée sous forme de briquettes communément appelées « HBI » - pour *Hot Briquetted Iron* en anglais (voir Figure 60). Cette transformation en HBI permet leur transport sur de grandes distances tout en limitant le risque de réoxydation du minerai. La naissance de cette filière de production de minerais préreduits est intimement liée à l'essor de la filière électrique, qui demande des ferrailles mais également des substituts dont les minerais réduits. Sur certains sites, la réduction directe peut être intégrée au procédé électrique. Les usines de réduction directe non intégrées (c'est-à-dire celles qui ne consomment pas directement les DRI qu'elles produisent) répondent généralement à une demande internationale et exportent des HBI [130]. À ce jour, la filière de réduction directe représente environ 5 % de l'acier produit dans le monde [131].



Figure 60: Minerai de fer préréduit sous la forme de fer briqueté à chaud, ou HBI³⁸.

L'intérêt de la filière intégrée DRI-EAF réside surtout dans le gain important que génère l'utilisation directe à chaud du DRI tout juste produit dans un four à arc électrique. Dans la mesure où le DRI est un matériau très poreux, il a tendance à s'oxyder très rapidement. Selon la teneur en carbone du minerai préréduit (entre 2,2 et 4 %), le chargement de DRI à une température de 600 °C dans le four à arc électrique permet une économie de l'ordre de 25 à 30 % sur la consommation électrique spécifique par rapport à une situation où il serait chargé à température ambiante [132].

En pratique, la production de DRI est aujourd'hui localisée dans les pays qui disposent de gaz naturel bon marché car moins cher que le coke. Cette technologie développée dans les années 1960 s'est imposée seulement au Moyen-Orient (particulièrement en Iran qui possède une trentaine d'usines de ce type), en Amérique latine ainsi qu'aux Etats-Unis [131]. Une seule usine en Europe existe, à Hambourg, détenue par le groupe ArcelorMittal. Il existe plusieurs procédés de production de fer préréduit qui sont résumés sur la Figure 61.

³⁸ Crédit photo : Borvan53/[Wikimedia Commons](#)

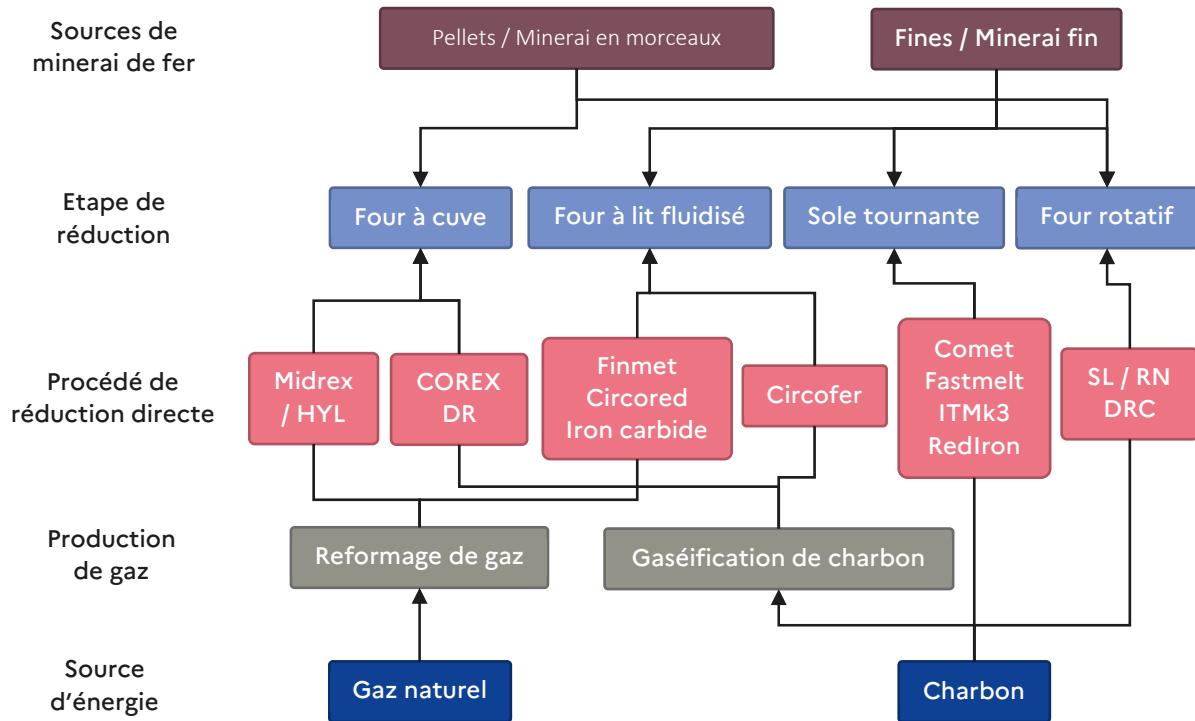


Figure 61: Principaux procédés de réduction directe (schéma adapté de P. Cavaliere et al. (2022) [133]).

Les procédés basés sur le gaz naturel et le four à cuve (MIDREX et Energiron/HYL) sont les procédés les plus développés pour la réduction directe et représentent près de 80 % de la production mondiale de DRI. La production du gaz réducteur composé de H₂ et de CO se fait par reformage du gaz naturel à l'extérieur du réacteur (four à cuve appelé « *shaft furnace* » en anglais) contrairement au haut fourneau (exemple du procédé MIDREX Figure 62). Dans un réacteur DRI, 60 à 70 % de la réduction des oxydes vient de l'H₂ et 30 à 40 % vient du CO [37]. Le gaz s'échappant du four à cuve par le haut est lavé et séparé en deux flux, l'un étant mélangé directement avec le gaz naturel en temps qu'intrant matière et l'autre servant de combustible pour l'apport de chaleur nécessaire au reformeur.

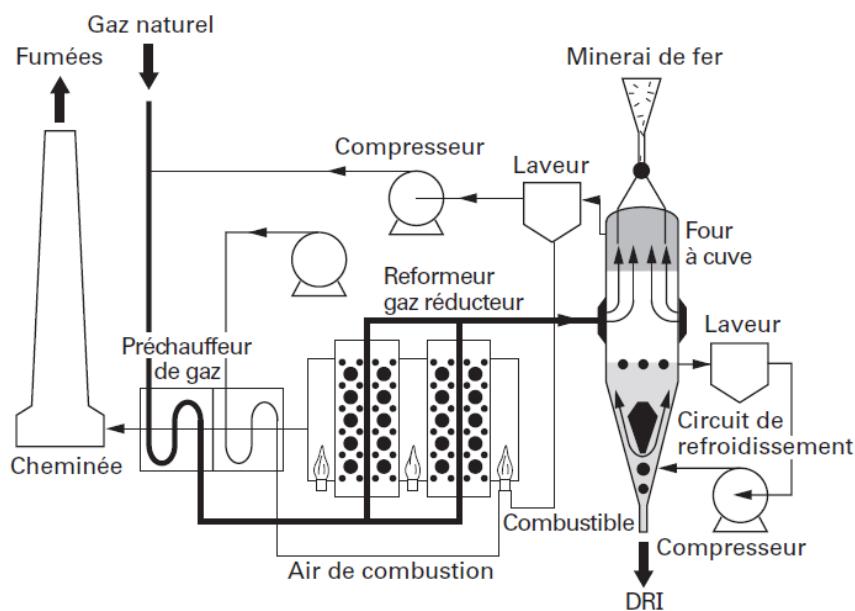


Figure 62: Schéma du procédé MIDREX [130].

Les procédés à lit fluidisé peuvent fonctionner à la fois avec du gaz naturel (par ex. Finmet, Circored) et du charbon (par ex. Circofer). Les procédés à sole tournante (par exemple Fastmelt et ITMk3) sont d'autres processus développés. Les procédés de réduction par fusion (« *smelting* ») ont été développés pour produire du métal chaud à partir de minerai de fer sans

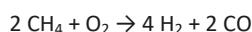
utilisation de coke. Plusieurs procédés ont été proposés utilisant du minerai ou du minerai aggloméré (par ex. COREX, AISI et Technored) et des procédés utilisant des fines (par ex. Finex, Dios, Hismelt).

Historiquement, les filières de haut fourneau et la filière DRI produisent de l'acier primaire. Mais, les enjeux de décarbonation étant de plus en plus prégnants, les processus tendent à intégrer de plus en plus de ferrailles. En ce qui concerne la filière de réduction directe, la suite du rapport et la modélisation se concentrent uniquement sur les procédés du type MIDREX et HYL basés sur le four à cuve car ce sont les plus matures et les plus utilisés à date.

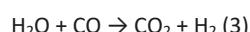
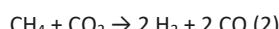
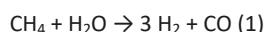
3.4.1.2. Procédé mixte gaz naturel/gaz de synthèse

Dans la mesure où le gaz réducteur produit à partir de gaz naturel est déjà composé à 55 % d'hydrogène, le gaz naturel peut être déjà partiellement substitué directement par de l'hydrogène, jusqu'à environ 1/3 sans changement majeur du procédé existant [134]. De nombreux experts ainsi que la littérature sur le sujet s'accordent à dire qu'il s'agit de la voie technologique la plus prometteuse pour décarboner presque entièrement la production d'acier primaire. Les premiers essais d'injection d'hydrogène pour la production de DRI ont été menés dans les années 90, démontrant ainsi le fonctionnement du concept à l'échelle industrielle jusqu'à une fraction d'hydrogène dans les gaz réducteurs de 90 % sur un procédé du type Energiron/HYL [76]. **Plusieurs aspects sont à prendre en compte lors d'une substitution partielle du gaz naturel par de l'hydrogène.**

Dans un procédé de réduction directe fonctionnant sur un mélange de gaz réducteurs comme dans le procédé Energiron/HYL présenté sur la Figure 63, le four à cuve (appelé « *shaft furnace* » en anglais) est un réacteur à contre-courant dans lequel les oxydes de fer présents sous la forme de pellets rentrent en contact avec des gaz réducteurs qui ont un mouvement ascendant. A la sortie du four à cuve, les gaz résiduels contiennent du CO₂ et du H₂O, qui sont en fait les produits de la réduction des oxydes de fer par l'hydrogène et le carbone, mais également des composés qui ont encore un pouvoir réducteur (H₂, CH₄ et CO). Ces gaz sont donc recirculés au mélange pour pouvoir être réutilisés avec, au passage, une élimination de l'eau par condensation et du CO₂ par lavage aux solvants. Autrement, ces composés sans pouvoir réducteur viendraient s'accumuler dans la boucle de recirculation. Par ailleurs, le CO₂ éliminé de cette boucle par lavage au solvant (parfois appelé CO₂ « sélectif ») constitue un flux capté quasi-pur prêt au transport et au stockage. Dans le concept proposé par N. Müller et al. (2021) [76] sur la Figure 63, une partie de la chaleur des gaz d'échappement (température de 400 – 450 °C) est utilisée pour combler la pénalité énergétique liée à la régénération du solvant pour le captage du CO₂. La boucle de gaz réducteur est alimentée en continu par un nouveau mélange de gaz naturel (CH₄) et de gaz de synthèse (H₂, H₂O, potentiellement CO et CO₂). Une partie est utilisée en combustion pour préchauffer le mélange de gaz réducteurs à environ 900 °C. Dans l'étape suivante, de l'oxygène est injecté dans le circuit de gaz afin de réaliser une oxydation partielle du méthane selon la réaction suivante :



Cette réaction étant exothermique, elle permet de porter le mélange de gaz réducteur à une température supérieure à 1 050 °C avant d'être injecté dans le four à cuve. L'hydrogène et le monoxyde de carbone réalisent la réduction des oxydes de fer, produisant ainsi du CO₂ et du H₂O. En plus de l'H₂ et du CO déjà présent dans le gaz injecté, le reformage du CH₄ directement au sein du réacteur permet d'en générer encore plus. Le méthane subit ainsi une réaction de vaporeformage avec l'eau (1) et une réaction de reformage à sec avec le CO₂ (2) qui sont par ailleurs catalysées par le fer métallique présent à la surface des pellets. En parallèle, il se produit également une réaction de gaz à l'eau (3) qui permet d'augmenter la fraction d'H₂ au détriment du CO.



En sortie, le désormais DRI quitte le four à cuve dans la partie inférieure à une température de l'ordre de 600 à 700 °C. Celui-ci est ensuite chargé et mis en fusion dans un four à arc électrique, éventuellement en mélange avec des ferrailles.

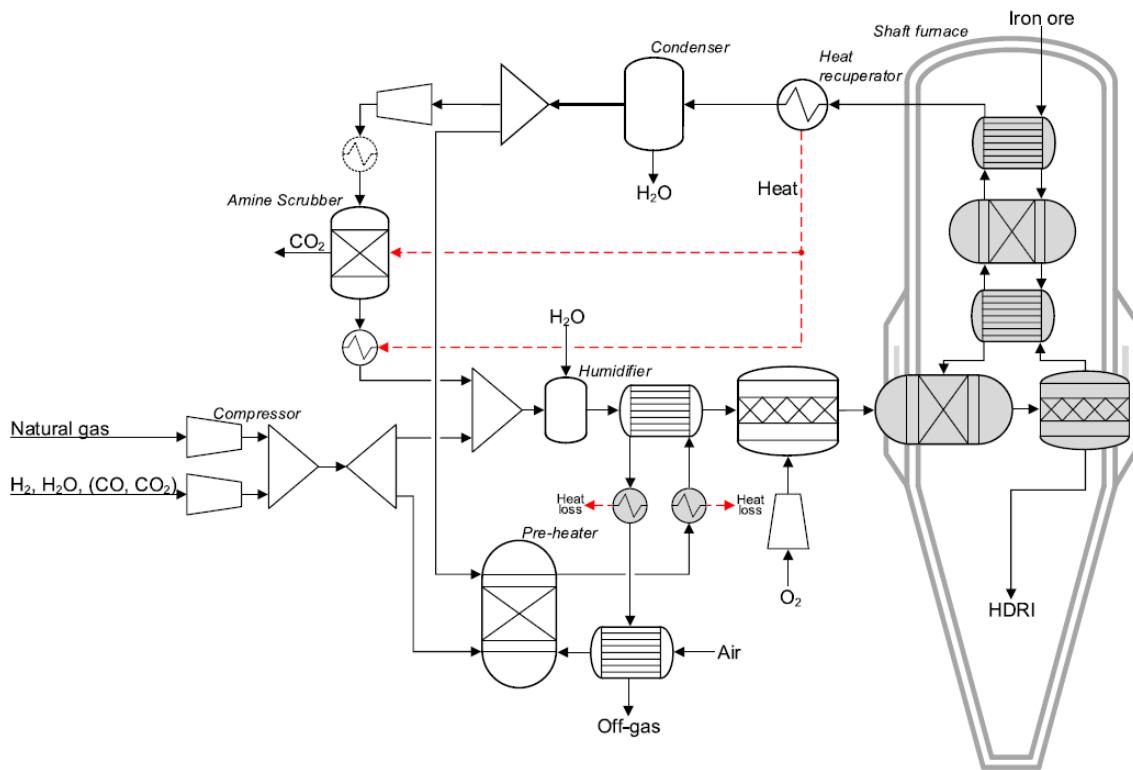


Figure 63: Schéma du procédé de réduction directe Energiron/HYL [76].

Il est important de noter que, même avec une cinétique plus favorable de l'hydrogène entre 800 et 900 °C, il est expérimentalement constaté que plus la teneur en H_2 est importante par rapport au CO, plus le taux de conversion métallique est faible (Figure 64). F. Patisson et O. Mirgaux (2020) [135] donne une double explication à ce phénomène, à première vue contre-intuitif. D'abord, la dernière réaction de réduction de la wustite (FeO) en fer est thermodynamiquement favorisée pour le CO en tant qu'agent réducteur lorsque la température diminue, contrairement à l' H_2 . Ensuite, le bilan global de réduction des oxydes de fer est endothermique avec l' H_2 et exothermique avec le CO. Du méthane (CH_4) est généralement présent dans le gaz de synthèse et son craquage dans le four à cuve a tendance à abaisser localement la température au centre du réacteur (réaction endothermique) tandis que la réduction des oxydes par le CO a tendance à maintenir une température élevée. Lorsque ces phénomènes sont combinés, la présence d'une trop grande quantité d' H_2 par rapport au CO défavorise la réduction de la wustite (FeO) en fer dans la zone centrale du four à cuve, plus froide, et c'est la raison pour laquelle la réduction par le CO (au moins dans cette zone) est essentielle pour le taux global de conversion métallique. A noter que ce problème technique ne concerne *a priori* pas les futurs procédés potentiellement développés fonctionnant avec 100 % d' H_2 . En effet, si un système est prévu pour fonctionner avec 100 % d' H_2 , il peut être avantageux de choisir le design du four à cuve en lui donnant une forme plus allongée en hauteur et un diamètre plus faible. **Ainsi, au moment de la décision finale d'investissement et du lancement des études d'ingénierie, il est important de prévoir d'entrée de jeu si le système devra fonctionner avec 100 % d' H_2 car cela conditionne le design optimal du four à cuve.**

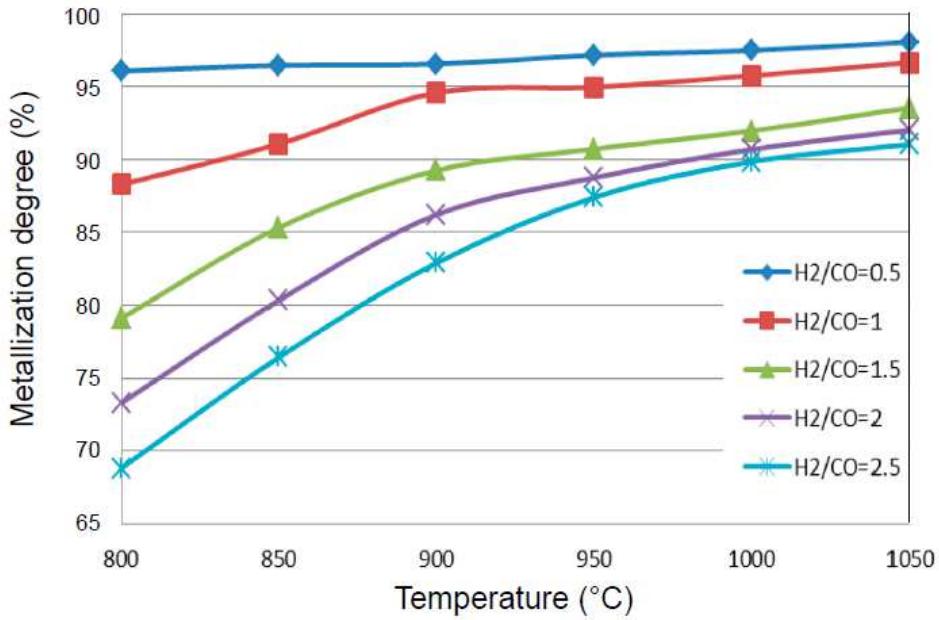


Figure 64: Taux de conversion métallique du DRI à la sortie four MIDREX en fonction de la température et du ratio H₂/CO [135].

Enfin, un autre aspect fondamental concerne la maîtrise de la teneur en carbone du DRI. Lors de sa production, le changement d'intrant réducteur entre du gaz naturel et du gaz de synthèse (composé de H₂ et CO) peut modifier la teneur en carbone contenu dans le DRI. Les travaux de N. Müller et al. (2018) [136] tendent à montrer que la teneur en carbone dans le DRI reste stable jusqu'à un taux d'injection de 65 %_{vol} d'hydrogène avant de décliner rapidement pour être presque nulle à partir d'environ 85 %_{vol} d'hydrogène (voir Figure 65). Cette teneur en carbone dans le DRI sera déterminante dans la suite du procédé car elle conditionnera la quantité de charbon et d'oxygène à injecter dans le four à arc électrique. Une teneur élevée en carbone dans le DRI nécessitera une plus grande injection d'oxygène pour retirer ce carbone ce qui aura tendance, dans une réaction secondaire, à oxyder une partie du fer qui sera finalement perdu sous forme de FeO dans le laitier. En considérant par ailleurs que le taux de réduction des oxydes augmente avec la teneur en H₂, les études théoriques en viennent à la conclusion qu'**une augmentation de la fraction d'H₂ dans le DRP a indirectement tendance à améliorer le rendement ferrique global en sortie d'EAF** (jusqu'à un maximum d'environ 5 points de % d'après les résultats de N. Müller et al. (2021) [76]).

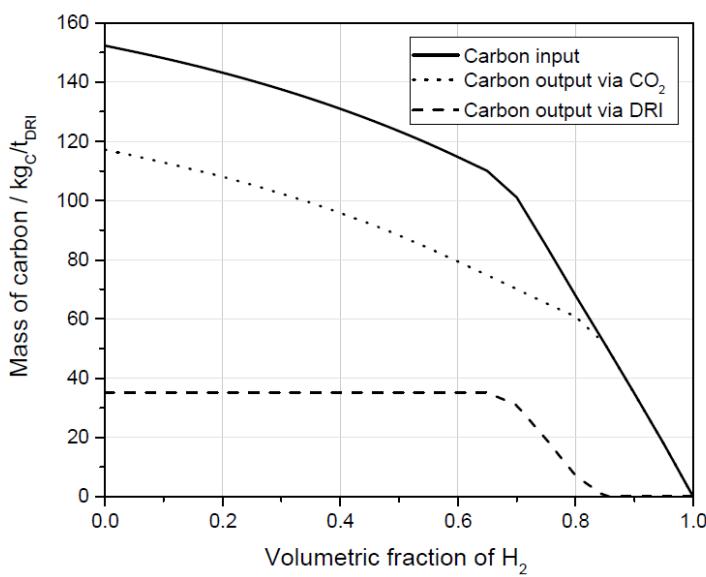


Figure 65: Bilan massique du carbone en entrée et sortie du DRP par tonne de DRI [136].

Pour l'industriel, il est intéressant de disposer d'une plage de fonctionnement permettant de produire du DRI avec une teneur constante en carbone car cela permet de donner de la flexibilité au procédé (pour notamment jouer sur les fonctionnalités de l'électrolyseur) tout en évitant des opérations de contrôle en aval dans la mesure où la composition du DRI est connue. Cela permet également d'améliorer les conditions de transports et de stockage car le DRI avec une teneur élevée en carbone

est moins sujet à l'auto-inflammation (substance dite « pyrophorique ») et donc ne nécessite pas d'opération de briquetage [76].

3.4.1.2.1. Captage du CO₂ sur procédé DRI-EAF

Comme indiqué dans la partie 3.4.1.2, lorsque le procédé DRI-EAF fonctionne sur du gaz naturel, une partie du CO₂ est retiré sélectivement de la boucle de gaz réducteurs. Ce flux de CO₂ se trouve sous une forme très concentrée car issue d'une technologie de captage par solvant. Il peut donc être considéré comme prêt au transport et stockage si l'option technologique était choisie. D'après K. Benavides et al. (2022) [137], cette option reviendrait à rajouter une consommation électrique de 160 kWh/t_{acier} par rapport à un cas sans CCS, soit 133 kWh/t_{DRI}. Cette valeur a été retenue dans la modélisation. Un taux de captage de 100 % a été supposé pour le CO₂ « sélectif » tandis qu'un taux de captage de 90 % a été supposé pour le CO₂ « non sélectif » (soit équivalent à un flux issu d'une combustion classique). Le coût d'investissement de l'unité de captage a été pris égale à 127,91 USD/t_{acier.an}³⁹ ou environ 107 EUR/t_{acier.an}³⁹ ou encore 89 EUR/t_{DRI.an}. Les hypothèses retenues pour la modélisation du captage du CO₂ sont résumées dans le Tableau 23.

	Production de vapeur	20,7 kWh _e /t _{HRC}
	Captage du CO ₂	50,8 kWh _e /t _{HRC}
	Compression du CO ₂	101,1 kWhe/t _{HRC}
	Total	172,6 kWhe/t _{HRC}
Consommation d'électricité supplémentaire	Pénalité de captage	3,03 GJ/tCO ₂
Consommation de chaleur supplémentaire	Efficacité de la chaudière	3 767 MJ/t _{HRC}
	Taux de captage	89,2 %
		90 %

Tableau 23: Hypothèses liées à la modélisation du captage de CO₂ sur DRI-EAF.

3.4.1.3. Vers un procédé 100 % hydrogène

Plusieurs papiers scientifiques portent sur l'étude d'un procédé DRI-EAF fonctionnant avec 100 % d'hydrogène (dans la suite du rapport, cette voie sera abrégée H₂-DRI-EAF). C'est notamment le cas de V. Vogl et al. (2018) [138] dont le schéma de procédé est représenté sur la Figure 66. En 2017, ArcelorMittal a mis à l'arrêt une usine fonctionnant sur un procédé de type CIRCORED basée sur des réacteurs à lit fluidisé et qui avait été construite pour fonctionner avec 100 % d'H₂. En cause, des problèmes techniques et financiers qui font que l'usine n'est jamais parvenue à fonctionner avec 100 % d'H₂ [139].

Les essais expérimentaux montrent pourtant qu'entre 700 et 900 °C, la cinétique de réduction des oxydes de fer avec 100 % d'H₂ est plus rapide qu'avec un gaz de synthèse conventionnel (mélange de CO et d'H₂) du fait de la bonne diffusivité de l'H₂ au sein des pellets par rapport au CO. Cette vitesse de réaction plus élevée avec 100 % d'H₂ est synonyme de hausse de la productivité. Par rapport à un fonctionnement mixte CH₄/H₂, le fonctionnement avec 100 % H₂ permettrait en théorie d'opter pour une architecture plus compacte du four à cuve réduisant ainsi le coût d'investissement (CAPEX) et les pertes thermiques à travers les surfaces [131]. De plus, dans un procédé 100 % H₂, la boucle de gaz réducteur serait plus courte, le reformage partiel du méthane et donc l'injection d'oxygène ne serait plus nécessaire [135]. En plus d'une meilleure réactivité, l'hydrogène en tant qu'agent réducteur présente d'autres avantages par rapport au CO comme une plus faible viscosité, une meilleure capacité de diffusion, une meilleure conductivité thermique et aucun produit de réaction polluant [47].

³⁹ Hypothèse taux de change : 1 EUR = 1,2 USD

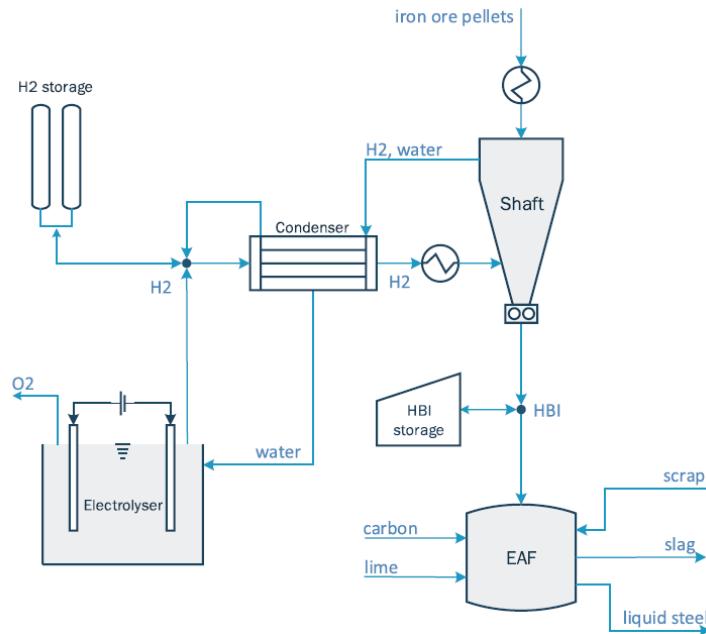


Figure 66: Proposition de design d'un procédé de réduction directe à l'hydrogène [138].

L'utilisation de 100 % d'hydrogène pose toutefois quelques défis techniques liés aux caractéristiques de sa réaction avec les oxydes de fer. Il se trouve que dans la dernière étape de réduction de la wustite (FeO) en fer (Fe), l'utilisation d'hydrogène est plus efficace que le monoxyde de carbone pour les hautes températures ($> 825^\circ\text{C}$) et inversement. Pour être efficace, un procédé de réduction par H_2 doit nécessairement s'opérer à des températures plus élevées qu'avec du monoxyde de carbone [140]. De fait, la réduction du minerai de fer avec de l'hydrogène est une réaction endothermique contrairement à la réduction à partir de carbone ce qui implique que le procédé doit être alimenté en énergie de façon continue tout le long du procédé [139]. Il n'est donc pas étonnant de voir que des études concluent à une consommation d'énergie plus importante pour la voie H_2 -DRI-EAF par rapport à la voie BF-BOF : c'est le cas de l'étude faite par A. Bhasker et al. (2020) [131] qui estime la consommation énergétique d'une voie H_2 -DRI-EAF à 3,72 MWh/t_{acier liquide} contre 3,48 MWh/t_{acier liquide} pour une voie BF-BOF.

De plus, dans la mesure où la réduction du minerai de fer dans la voie H_2 -DRI-EAF se fait à l'état solide, la porosité et la taille des boulettes sont des paramètres très importants car les gaz réducteurs doivent pouvoir se diffuser dans la structure poreuse des boulettes pour pouvoir réagir en profondeur avec les oxydes de fer. La vapeur d'eau formée à la suite de la réaction doit ensuite pouvoir s'échapper de la structure. À température élevée, la vitesse de réaction chimique est plus élevée que le flux massique qui traverse les boulettes ce qui fait de ce dernier paramètre le facteur limitant de la réaction. La vitesse de réaction avec de l' H_2 pur est plus importante qu'avec du gaz de synthèse traditionnel (composé de CO et d' H_2) à une température entre 700 et 900 °C. Au-delà de 900 °C, un phénomène de frittage s'observe sur les parois externes des boulettes diminuant ainsi la perméabilité, la vitesse de diffusion et de réaction [135]. C'est la raison pour laquelle la température de réaction est fixée aux alentours de 800 °C avec un apport de chaleur fourni par exemple par un chauffage électrique.

Enfin, comme la réaction a lieu à une température supérieure à 570 °C, il y a formation de wustite (FeO) qui n'a pas complètement réagi à la sortie du four à cuve. Dans l'analyse de A. Bhasker et al. (2020) [131], le taux de fer métallique (Fe) en sortie de cuve est supposé être de 94 %, le reste étant de la wustite (FeO) qui doit être désoxydée. Cette réaction se fait dans le four à arc électrique par ajout de carbone et d'oxygène pour former du CO qui viendra réagir avec la wustite (FeO) pour donner du fer métallique (Fe) et du dioxyde de carbone. C'est la raison pour laquelle, il demeure toujours des émissions résiduelles de CO_2 dans un procédé H_2 -DRI-EAF tel que théorisé par A. Bhasker et al. (2020) [131]. En l'absence de carbone comme agent réducteur dans le procédé H_2 -DRI-EAF (donc avec un procédé fonctionnant à 100 % sur de l' H_2), le défi technique réside en grande partie dans la fusion du DRI dans le four à arc électrique et l'hydrogène ne permet pas en pratique de couvrir 100 % de la réduction des oxydes de fer. L'ajout de carbone sert également à la production de carbure de fer (FeC) pour la mise à nuance de l'acier et le CO sert à la formation d'un laitier moussant, essentiel au fonctionnement du four à arc électrique pour le stabiliser et allonger la durée de vie des électrodes en graphite et des réfractaires. La présence de carbone dans le DRI lors de la fusion permet un apport thermique (par oxydation du carbone) contribuant ainsi à la fusion du métal [131], [139], [141]. L'apport de carbone peut également venir de l'introduction de ferrailles dans le four à arc électrique [141]. En fonctionnement standard, l'énergie chimique produite par l'oxydation du carbone présent dans la charge métallique représente entre 20 et 30 % de l'apport thermique total du four à arc électrique [141].

Zoom sur le projet HYBRIT

HYBRIT (pour “*Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology*”) est un projet d’envergure industrielle qui a pour but d’étudier et de produire de l’acier à partir d’hydrogène décarboné. Le projet, dont le pilote est basé à Luleå en Suède, est le fruit d’une coopération entre l’entreprise minière LKAB, l’entreprise sidérurgique SSAB et Vattenfall, le principal fournisseur énergétique du pays. Officiellement né en février 2018 avec la décision de construire un premier pilote, HYBRIT est aujourd’hui presque devenu un symbole de l’avancement des travaux sur la décarbonation de l’acier [142]. En août 2021, le consortium a annoncé avoir obtenu la première plaque d’acier au monde produite avec 100 % d’hydrogène sur son pilote industriel qui serait livrée au groupe Volvo [143].

3.4.1.4. Voie DRI-Melter-BOF

L’un des inconvénients de la filière DRI-EAF est le prix plus élevé des pellets par rapport au minerai de qualité HF (de l’ordre de 10 à 20 % sur le marché selon la conjoncture [144]). La voie DRI-EAF nécessite en effet des intrants métalliques avec une teneur en fer plus élevée (supérieure à 65 %) contrairement à la voie HF. La contrainte technique réside non pas dans la production de DRI au sein du réacteur DRP qui peut en pratique tolérer une charge contenant moins de 65 % de fer, mais dans la fusion du DRI dans un EAF. La maîtrise de la quantité et la qualité du laitier formé dans un four à arc électrique est un paramètre essentiel lors de la fusion du DRI, or une teneur en fer insuffisante du DRI génère indirectement plus de laitier ce qui complique les opérations métallurgiques pour le four à arc électrique.

De nouvelles solutions techniques sont en train d’émerger dans le secteur pour intégrer des minerais de moins bonne qualité pour la production de DRI. En effet, une autre configuration possible consiste à ajouter une étape de fusion du DRI dans un four spécial avant chargement du métal fondu dans le convertisseur à oxygène (en anglais, une telle voie de production est désignée par « DRI-Melter-BOF »). L’ensemble DRI-Melter imite en quelque sorte la production de fonte liquide dans un haut fourneau, raison pour laquelle le métal peut ensuite être traité dans un convertisseur à oxygène. Cette configuration est étudiée par plusieurs entreprises sidérurgiques comme le groupe Thyssenkrupp, ArcelorMittal ou encore BlueScope. Pour l’étape de fusion du DRI, deux technologies sont principalement envisagées : le four à arc immergé (ou « SAF » en anglais pour « *Submerged Arc Furnace* ») et le four de fusion à bain de laitier ouvert (ou « OSBF » en anglais pour « *Open Slag Bath Furnace* »).

Un four SAF (voir Figure 67) est un type particulier de four électrique. Il est surtout adapté à la production de ferroalliages (Fe-Mn, Fe-Si ...) du fait d’un meilleur contrôle de température [145] mais également à l’extraction de certains métaux non ferreux (zinc, plomb, cuivre ...) [146]. Dans ce type de four, l’électrode plonge dans le bain et la fusion du métal se fait en continu contrairement au four à arc électrique qui fonctionne par batch. L’électricité est convertie en chaleur à travers la résistance des matériaux qui rentrent alors en fusion [146].

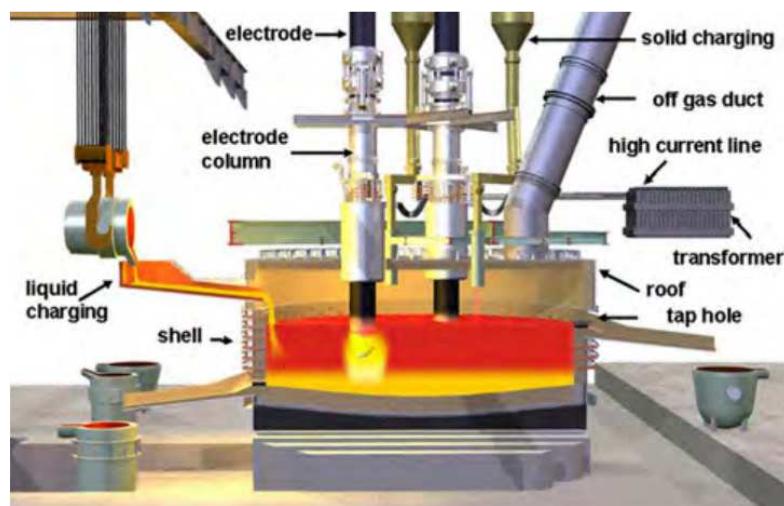


Figure 67: Principaux composants d’un four à arc immergé [146].

Un four OSBF, sur lequel travaille en particulier le groupe italien TENNOVA (voir Figure 68), a un fonctionnement très proche. La principale différence réside en la position de l’électrode : dans un four SAF, l’électrode est immergée dans le bain en fusion tandis que dans un OSBF, l’électrode se trouve au-dessus et génère un arc à brosse (« *brush arc* » en anglais) [18]. D’après P. Cavaliere et al. (2022) [133], contrairement au SAF, la charge contenue dans un OSBF n’a pas d’influence sur le courant électrique car l’électrode n’est pas immergée, d’où un meilleur contrôle opérationnel du procédé. C’est aussi pour cette raison que les fines de minerai peuvent aussi être consommées par ce type de four. Toutefois, du fait d’une configuration en « arc ouvert », un OSBF génère plus de pertes thermiques à travers le toit et une détérioration plus rapide des réfractaires

qui doit être réduite par un système de refroidissement. Un OBSF permettrait également de réduire les coûts opérationnels par rapport à un four à arc électrique. Tout d'abord, l'utilisation d'électrodes de type « Soderberg » dans un OSBF aurait un coût de revient plus faible que des électrodes en graphite conventionnelles. De plus, le changement des réfractaires dans un OSBF fonctionnant de manière stable et continue peut se faire tous les 5 à 7 ans par rapport à un EAF qui doit typiquement subir des opérations de maintenance environ toutes les deux semaines [133].

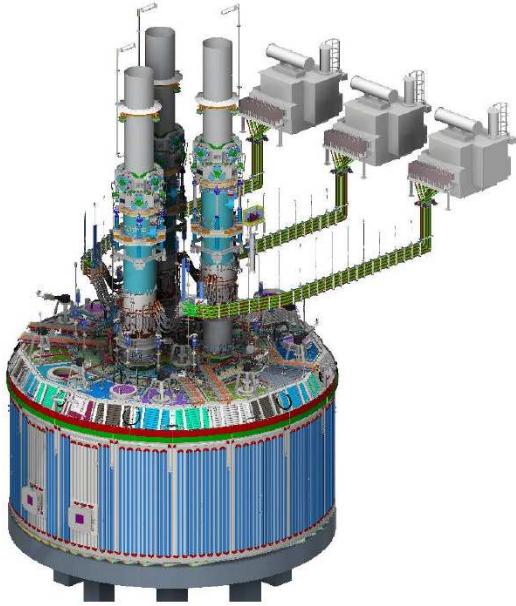


Figure 68: Représentation d'un four OSBF développé par TENOVA [133].

3.4.2. Modélisation de la voie DRI-EAF

Dans la modélisation, le procédé DRI-EAF étant fondamentalement différent des filières conventionnelles, il est traité comme une usine de référence et non comme un levier de décarbonation qui viendrait s'activer sur une usine existante. A l'année de départ, le modèle considère que l'usine est bien existante mais qu'elle a une production nulle et donc des émissions et une consommation énergétique nulles. Pour l'activer à partir d'une certaine année, il suffit d'augmenter sa production de façon plus ou moins progressive en miroir d'une diminution de la production des autres usines que le procédé est censé substituer.

La Figure 69 permet de visualiser en détail le procédé de l'usine de référence DRI-EAF (REF3) telle que modélisée sur la base d'une technologie du type Energiron/HYL (voir partie 3.4). L'usine a été construite de manière à avoir un fonctionnement hybride hydrogène/gaz naturel qui peut être piloté par l'utilisateur à travers le pourcentage volumique d'hydrogène (%_{vol}H₂). Le taux d'injection d'hydrogène peut prendre toutes les valeurs de 0 % (cas du fonctionnement 100 % gaz naturel) jusqu'à 100 %. Il est également possible de piloter la part de ferrailles (par rapport à la part de DRI) introduite dans le four à arc électrique. Les paramètres de fonctionnement de l'usine (consommation d'oxygène, émissions spécifiques, etc.) dépendent en grande partie de ces deux variables et c'est la raison pour laquelle la Figure 69 n'indique pas toutes les valeurs numériques. Par exemple, la production de laitier au niveau du four à arc électrique tend à augmenter lorsque la part de DRI augmente car le DRI contient une plus grande proportion de gangue⁴⁰ que la ferraille. De même, la consommation d'oxygène tend à diminuer lorsque la part volumique d'hydrogène augmente car il y en a moins besoin pour l'oxydation partielle du CH₄. Le procédé s'arrête à la production d'acier liquide, l'étape suivante de coulée continue et de laminage à chaud étant supposée être strictement identique à l'usine intégrée de hauts fourneaux (usine REF1, voir Figure 33).

Les fonctions auxquelles obéit le fonctionnement du procédé DRI-EAF (présentées sur les Figure 70, Figure 71, Figure 72, Figure 73, Figure 74 et Figure 75) ont été modélisées essentiellement sur la base du travail de N. Müller et al. (2021) [76], N. Müller et al. (2018) [136] et K. Rechberger et al. (2020) [134]. La plupart des résultats de N. Müller et al. (2021) [76] n'étant présentés que sous forme graphique, les fonctions ont été reproduites par lecture graphique puis par superposition d'une courbe de tendance, un polynôme de degré six la plupart du temps afin d'avoir une reproduction la plus précise et la plus fidèle possible. Les autres hypothèses numériques fixes (telle que la consommation électrique spécifique du four de réduction direct) ont été prises sur la base de N. Müller et al. (2021) [76], de A. Bhaskar et al. (2020) [131] et de P. Cavalieri et al. (2022) [133].

⁴⁰ La gangue désigne l'ensemble des composants d'un minerai qui ne présente pas de valeur et dont on veut en général se débarrasser. Dans le cas du minerai de fer, cela inclut par exemple la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et le phosphore (P).

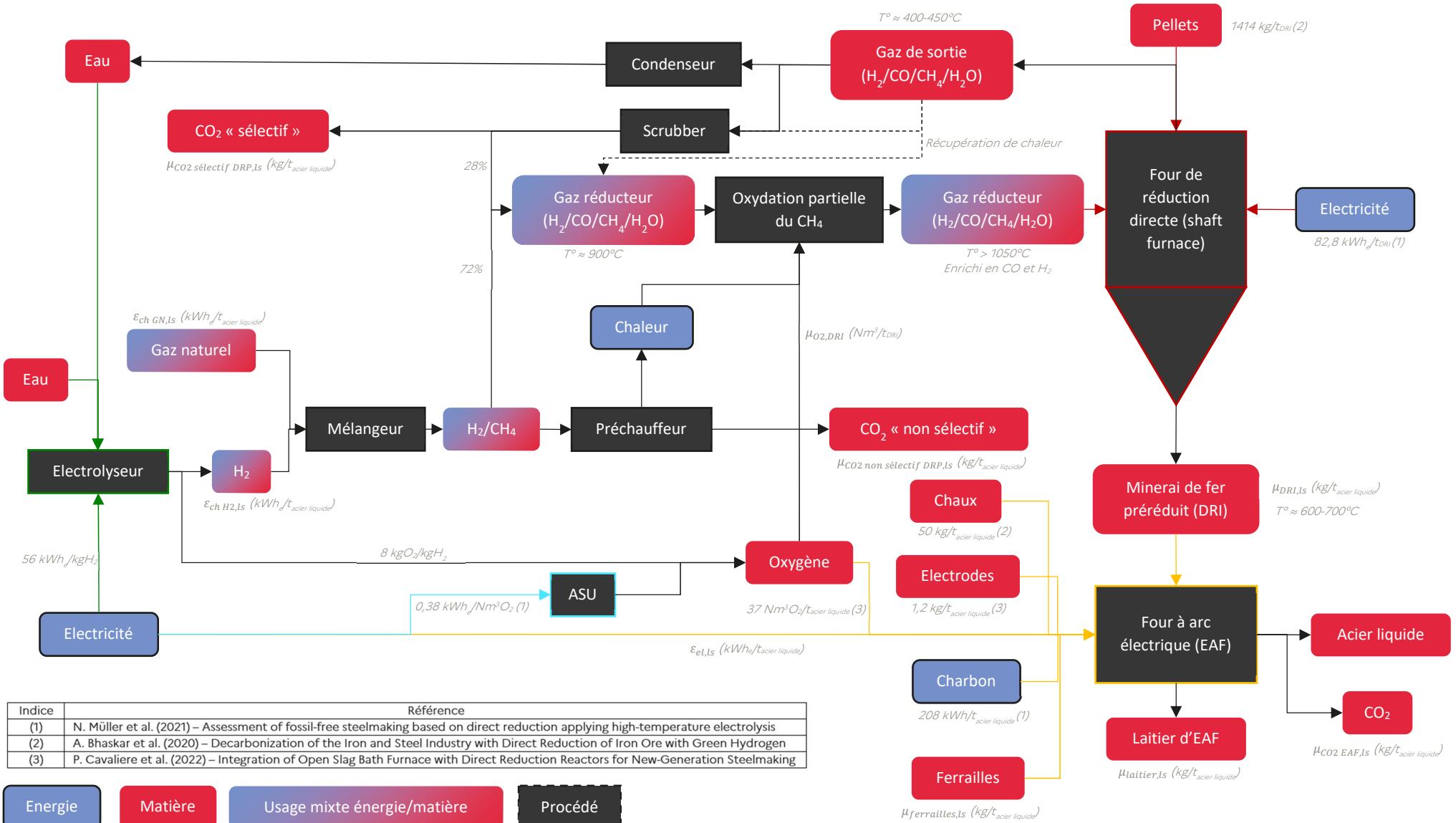


Figure 69: Usine de référence REF3 DRI-EAF – Schéma de procédé.

La consommation énergétique totale du DRP évolue à mesure que l'hydrogène vient se substituer au gaz naturel. En l'occurrence, elle a tendance à diminuer comme illustré sur la Figure 70. Cela peut sembler paradoxal dans la mesure où la réduction des oxydes de fer avec l'hydrogène est endothermique et donc nécessite d'être plus alimentée en énergie comparée à la réduction avec le carbone qui elle est exothermique. Toutefois, l'énergie chimique sous forme de CH₄ et H₂ qui alimente le DRP doit aussi permettre de combler la pénalité thermique pour capter le CO₂ des gaz de sortie au niveau du « scrubber » (voir Figure 69). Lorsque l'hydrogène vient se substituer au CH₄, il y a de moins en moins de CO₂ à retirer de la boucle de gaz réducteur et donc le besoin en énergie chimique du DRP tend à diminuer. Il se trouve que ce dernier effet est prépondérant par rapport au caractère endothermique de la réduction à l'hydrogène, raison pour laquelle la consommation totale d'énergie chimique du DRP diminue avec l'injection d'hydrogène.

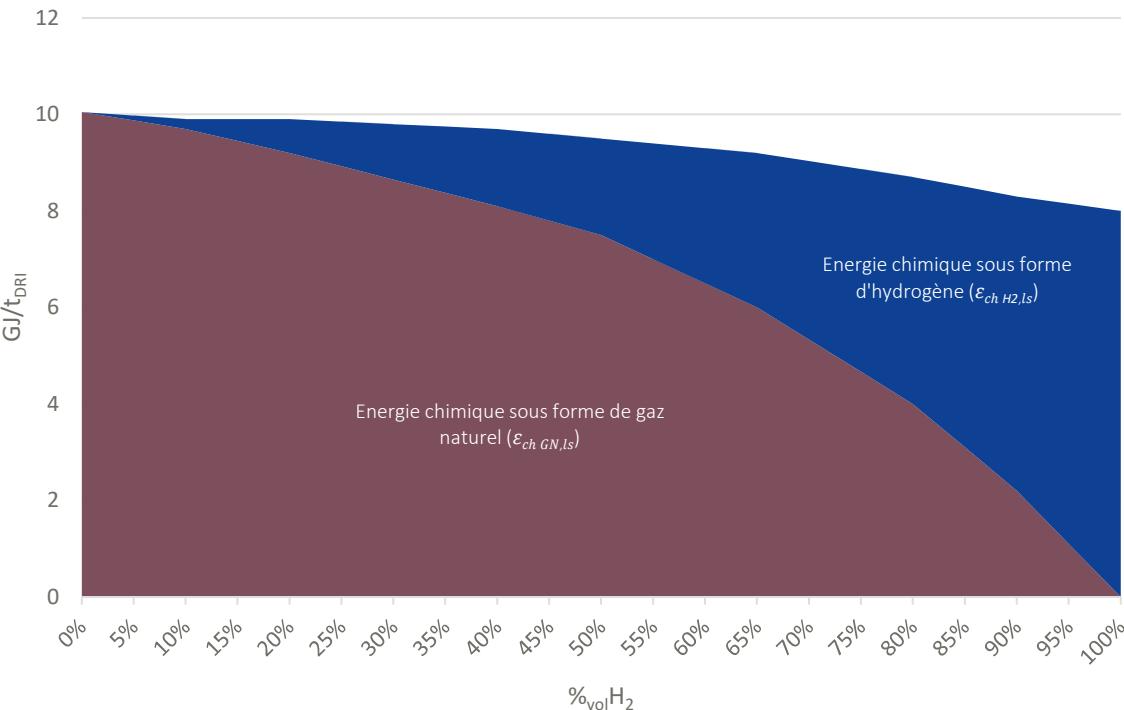


Figure 70: Usine de référence REF3 DRI-EAF – Consommation énergétique du DRP en fonction de %volH₂ (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2021) [76]).

Le modèle de l'usine DRI-EAF distingue trois sources d'émissions : le CO₂ généré par le four de réduction directe dit « sélectif » ($\mu_{CO_2 \text{ sélectif } DRI,ls}$), le CO₂ « non sélectif » ($\mu_{CO_2 \text{ non sélectif } DRI,ls}$) ainsi que les émissions issues du four à arc électrique ($\mu_{CO_2 EAF,ls}$). Le CO₂ « sélectif » provient en fait du lavage du gaz de sortie avant que celui-ci puisse être réutilisé comme gaz réducteur dans une forme de boucle. Le CO₂ « sélectif » a ceci de particulier qu'il se trouve sous une forme très concentrée car issue d'une technologie de captage par solvant. Ce flux peut donc être considéré comme prêt au transport et stockage si l'option technologique était choisie [137], [147]. Le CO₂ « non sélectif » est quant à lui issu de l'énergie thermique nécessaire pour le reformage du gaz naturel qui se trouve dans la boucle de gaz réducteur. En tant que simple produit de combustion, ce flux de CO₂ n'a rien de particulièrement propice au transport et au stockage. Pour cela, il faudrait lui appliquer une étape de captage au préalable. Enfin, le four à arc électrique est également source d'émissions de CO₂ du fait de la présence de la combustion de carbone contenu dans le DRI et le charbon.

Afin d'estimer le poids respectif de chacune des sources d'émissions, les résultats de K. Rechberger et al. (2020) [134] ont été utilisés pour modéliser les émissions liées au four de réduction directe qui sont données en kgCO₂/t_{DRI}. Dans le cas d'un fonctionnement à 100 % DRI, ces émissions ont été converties en kgCO₂/t_{acier liquide} sur la base d'une consommation spécifique de 1 200 kg_{DRI}/t_{acier liquide} issue de N. Müller et al. (2021) [76]. Ces émissions spécifiques du DRP ont ensuite été distribuées à 40 % pour le CO₂ « sélectif » et 60 % pour le CO₂ « non sélectif ». Cette répartition de 40 % / 60 % provient de N. Müller et al. (2021) [76] pour un fonctionnement 100 % gaz naturel mais le ratio a été supposé constant quel que soit le taux d'injection d'hydrogène %volH₂. Les émissions spécifiques du four à arc électrique ont été estimées par soustraction des émissions totales (fournies par N. Müller et al. (2021) [76]) et des émissions spécifiques du DRP. Le total des émissions de l'usine DRI-EAF est donc bien exactement égal aux données fournies par N. Müller et al. (2021) [76], seule la répartition de ces émissions a été en partie estimée grâce aux résultats de K. Rechberger et al. (2020) [134].

La Figure 71 présente ainsi l'évolution de ces trois sources d'émissions de CO₂ en fonction du taux d'injection d'hydrogène %volH₂. A mesure que l'hydrogène vient se substituer au CH₄, il y a de moins en moins de CO₂ présent dans les gaz de sortie

et donc moins à retirer sélectivement jusqu'à finalement disparaître lorsque la boucle de gaz réducteurs est uniquement alimentée par de l'hydrogène. De même pour le CO₂ « non sélectif » qui diminue à mesure que la quantité de CH₄ à oxyder se réduit. Pour comprendre l'évolution des émissions du four à arc électrique, il est d'abord nécessaire de préciser que l'usine a été modélisée sur un mode de fonctionnement dit « conventionnel ». Ce concept utilisé par N. Müller et al. (2021) [76] désigne un mode fonctionnement dans lequel la quantité de carbone additionnelle entrant dans le four à arc électrique (sous forme de charbon en l'occurrence) est maintenue constante pour des considérations pratiques et économiques. L'autre mode dit « thermodynamique » est lui destiné à opérer dans des conditions minimisant les émissions de CO₂ ce qui se traduit concrètement par une optimisation de la quantité de charbon en fonction du taux d'hydrogène et du taux de carbone dans le DRI. En plus de simplifier la modélisation, le mode « conventionnel » permettrait d'allonger la durée de vie de l'EAF et de réduire les coûts liés à la consommation d'énergie pour faire fondre le DRI. Sachant cela, il est donc normal de constater que les émissions au niveau du four à arc électrique sont à peu près constantes même lorsque le taux d'hydrogène est de 100% : le charbon reste nécessaire pour apporter de l'énergie thermique au DRI, pour faire mousser le laitier, pour réduire les oxydes de fer restants (et donc améliorer le rendement métal) et enfin pour carburer l'acier.

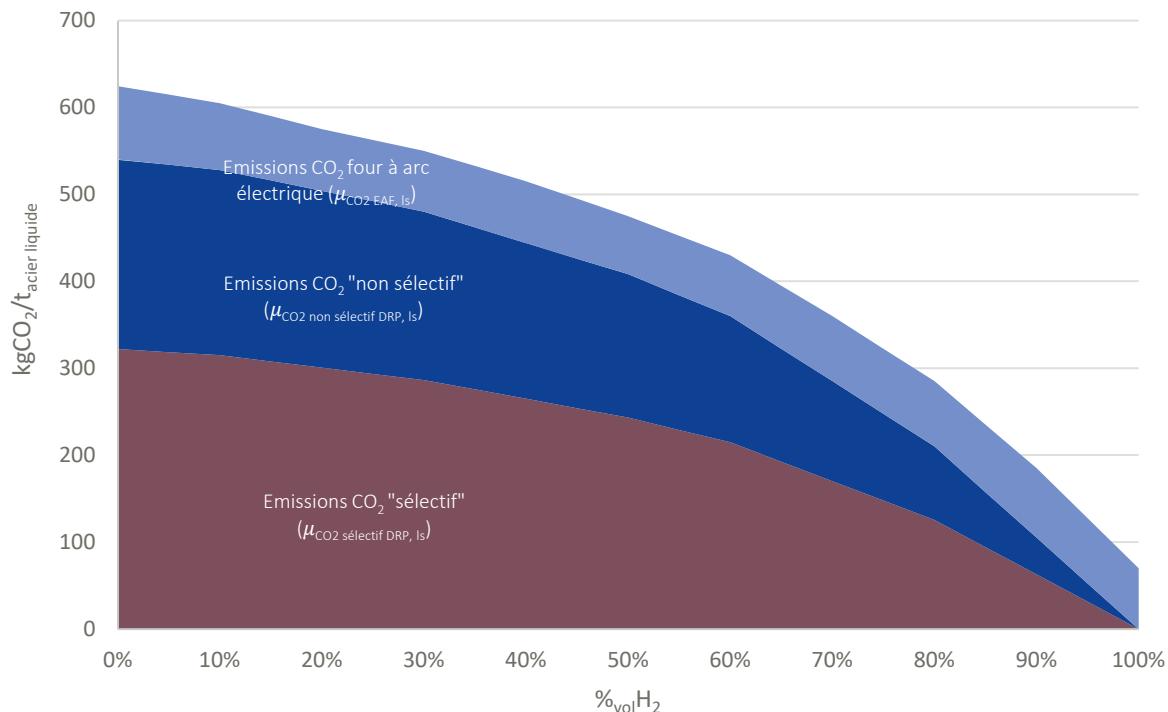


Figure 71: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Emissions de CO₂ en fonction de %volH₂ (taux de DRI fixe de 100%).

La consommation électrique spécifique du four à arc électrique varie également selon trois paramètres : la quantité de DRI consommée (par rapport à la quantité de ferrailles), la teneur en carbone %x_c dans le DRI qui dépend du taux d'injection d'hydrogène %volH₂ et selon que le DRI est chargé chaud à 600-700 °C (HDRI pour « Hot DRI ») ou froid (CDRI pour « Cold DRI »). La production de laitier dépend également de la quantité de DRI consommée ainsi que de la teneur en carbone %x_c dans le DRI. La Figure 72 reproduite à partir de N. Müller et al. (2021) [76] présente l'évolution de la consommation électrique spécifique et de la production de laitier par l'EAF en fonction de ces paramètres. Les variations suivantes peuvent être constatées :

- Plus la teneur en carbone %x_c dans le DRI est importante, plus la consommation électrique de l'EAF $\varepsilon_{el,ls}$ diminue : la combustion du carbone contenu dans le DRI permet d'apporter de l'énergie thermique à la charge et donc, en quelques sortes, de substituer de l'énergie électrique.
- Le chargement de DRI chaud (HDRI) permet de diminuer la consommation électrique $\varepsilon_{el,ls}$ par rapport au DRI froid (CDRI) : la chaleur contenue dans le DRI représente d'autant moins d'énergie à apporter sous forme d'électricité.
- Sauf dans le cas HDRI et x_c = 3,5 %, la consommation électrique de l'EAF $\varepsilon_{el,ls}$ tend à augmenter à mesure que la proportion de DRI augmente par rapport à la quantité de ferraille : cet effet est lié à une proportion de gangue (fraction ne contenant pas de fer, sans intérêt économique) plus importante dans le DRI que dans les ferrailles. Lorsque la part de DRI augmente, c'est parallèlement autant de matière supplémentaire à réchauffer « inutilement » ou qui, autrement dit, ne contribue pas à produire de l'acier. Dans le cas HDRI et x_c = 3,5 %, le double apport énergétique du DRI chaud et du carbone qu'il contient permet de contrebalancer cet effet.

- La quantité de laitier produite $\mu_{laitier,ls}$ augmente lorsque la proportion de DRI augmente : de même que pour la consommation électrique, le DRI contient une part de gangue plus importante que la ferraille qu'il est nécessaire de retirer sous forme de laitier.
- La quantité de laitier produite $\mu_{laitier,ls}$ augmente lorsque la teneur en carbone x_c augmente : plus la teneur en carbone du DRI est importante, plus il est nécessaire d'en retirer par injection d'oxygène. Or, l'oxygène n'a pas seulement pour effet d'oxyder le carbone mais il réagit également avec d'autres éléments métalliques dont le fer. Ainsi, lorsque l'injection d'oxygène augmente, une plus grande proportion de fer de retrouve perdue sous la forme d'oxydes de fer FeO dans le laitier. C'est également la raison pour laquelle le rendement ferrique est plus faible lorsque le taux de carbone dans le DRI est plus important.

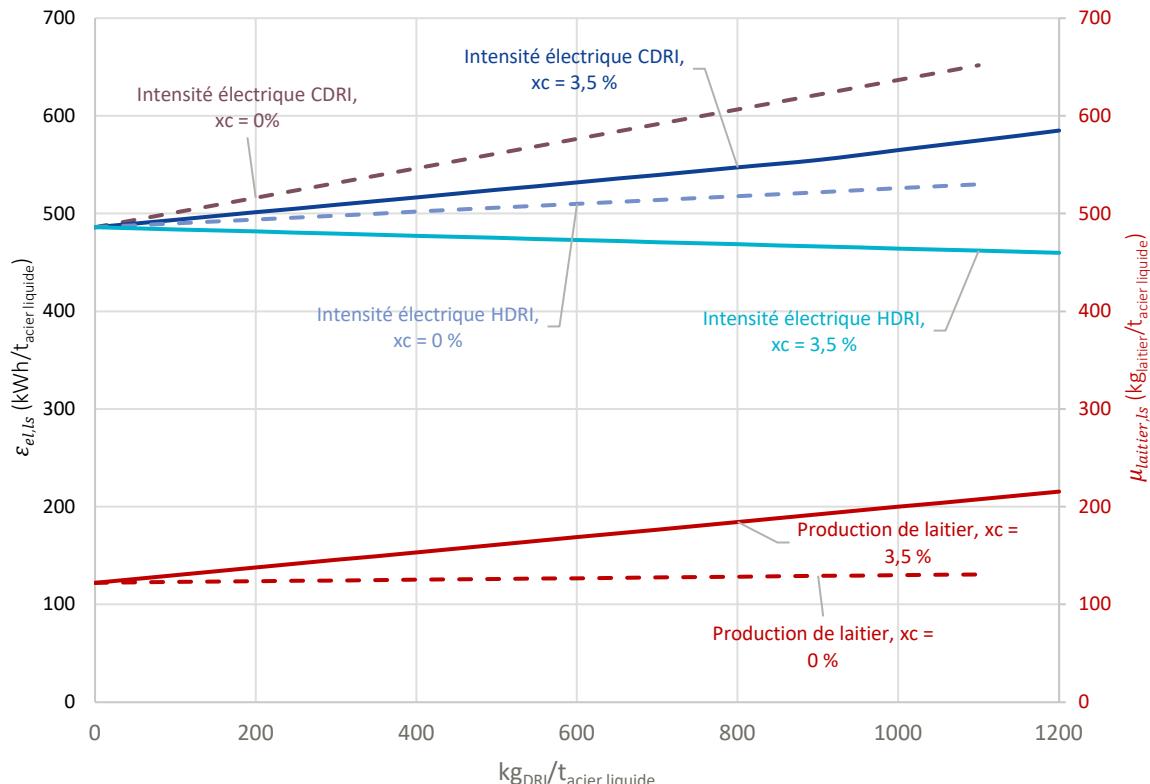


Figure 72: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation électrique $E_{el,ls}$ et production de laitier $\mu_{laitier,ls}$ de l'EAF en fonction de la quantité de DRI (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2021) [76]).

Concernant justement l'évolution de la teneur en carbone dans le DRI, celle-ci a été modélisée comme une fonction par morceau sur la base des résultats de N. Müller et al. (2018) [136]. Comme présenté sur la Figure 73, la teneur en carbone dans le DRI est constante égale à 3,5 % jusqu'à une proportion volumique d'hydrogène de 70 %, puis elle décline rapidement avant d'être nulle à partir d'un taux d'hydrogène de 90 %.

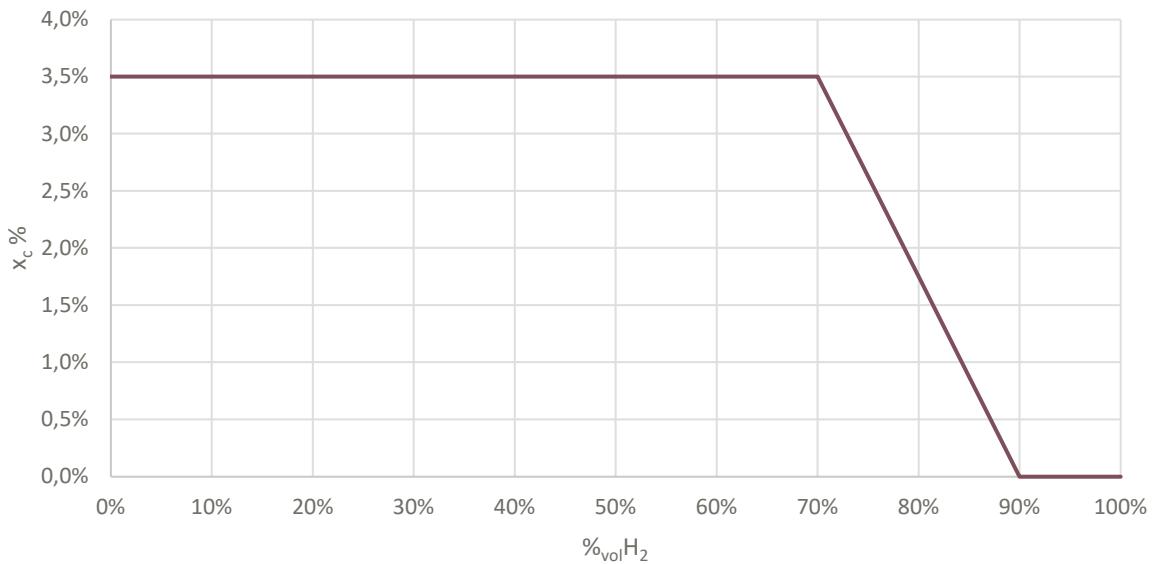


Figure 73: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Teneur en carbone dans le DRI en fonction de %volH₂ (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2018) [736].)

La consommation spécifique d'oxygène dans le DRP pour l'oxydation partielle du CH₄ varie selon le taux d'injection d'hydrogène %volH₂. N. Müller et al. (2021) [76] donne une valeur de 60 Nm³O₂/t_{DRI} pour un fonctionnement 100 % au gaz naturel. Par simplification, il a été supposé que ce besoin en oxygène au niveau du DRP variait linéairement selon le taux d'injection d'hydrogène %volH₂ et que la consommation serait nulle pour un fonctionnement 100 % H₂ (voir Figure 74). La consommation d'oxygène par l'EAF a été supposée constante prise égale à 37 Nm³/t_{acier liquide} sur la base de P. Cavalier et al. (2022) [133]. Par ailleurs, l'oxygène co-produit par électrolyse de l'eau est consommé en priorité, l'appoint étant fourni par un séparateur d'air (ou ASU pour « Air Separation Unit » en anglais). Le surplus d'oxygène est supposé être revendu à des consommateurs industriels voisins pour un prix de 60,8 EUR/tO₂ (hypothèse issue de V. Vogl et al. (2018) [138]) soit environ 87 EUR/kNm³ en prenant une masse volumique de 1,43 kg/Nm³ pour l'oxygène.

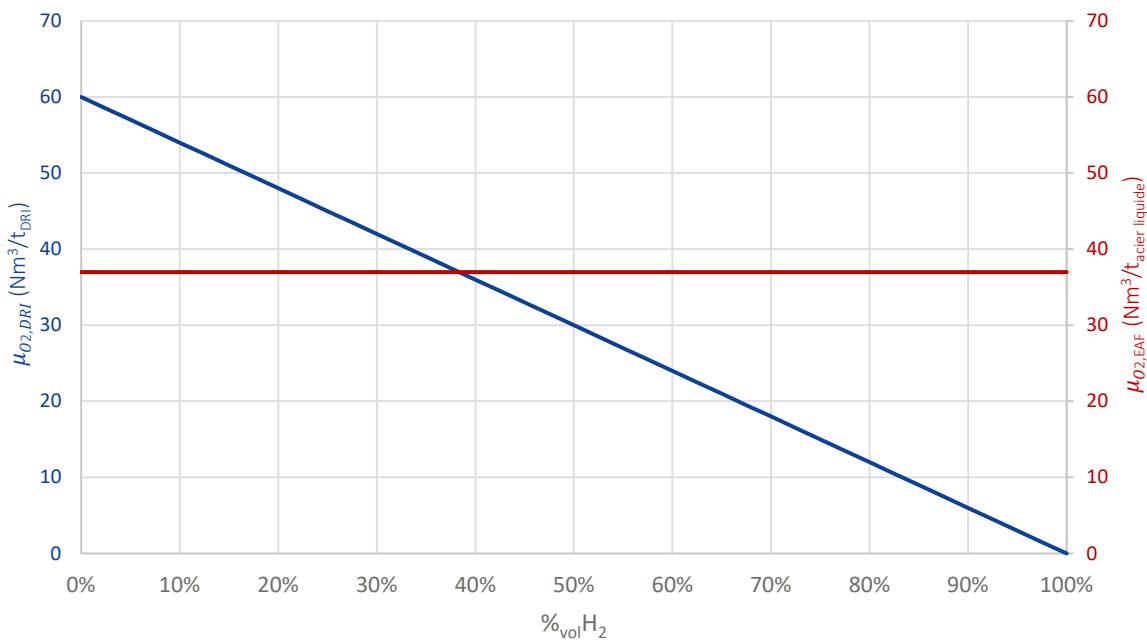


Figure 74: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation spécifique d'oxygène au DRP et à l'EAF en fonction de %volH₂.

La consommation spécifique (en kg/t_{acier liquide}) en DRI et en ferrailles dépend du % ferrailles chargé dans l'EAF mais également de la teneur en carbone du DRI pour les mêmes raisons présentées précédemment. Dans un cas avec 100 % de ferrailles, la charge nécessaire a été prise égale à 1 050 kg/t_{acier liquide} (hypothèse prise sur la base de L. Yang et al. (2017) [96]). Dans le cas avec 0 % de ferrailles (et donc 100 % de DRI), N. Müller et al. (2021) [76] permet d'estimer une consommation spécifique de DRI de 1 200 kg/t_{acier liquide} dans le cas où la teneur en carbone dans le DRI vaut 3,5 % et 1 100 kg/t_{acier liquide} dans le cas où la teneur en carbone dans le DRI vaut 0 %. Entre ces valeurs, une évolution linéaire a été supposée (voir Figure 75).

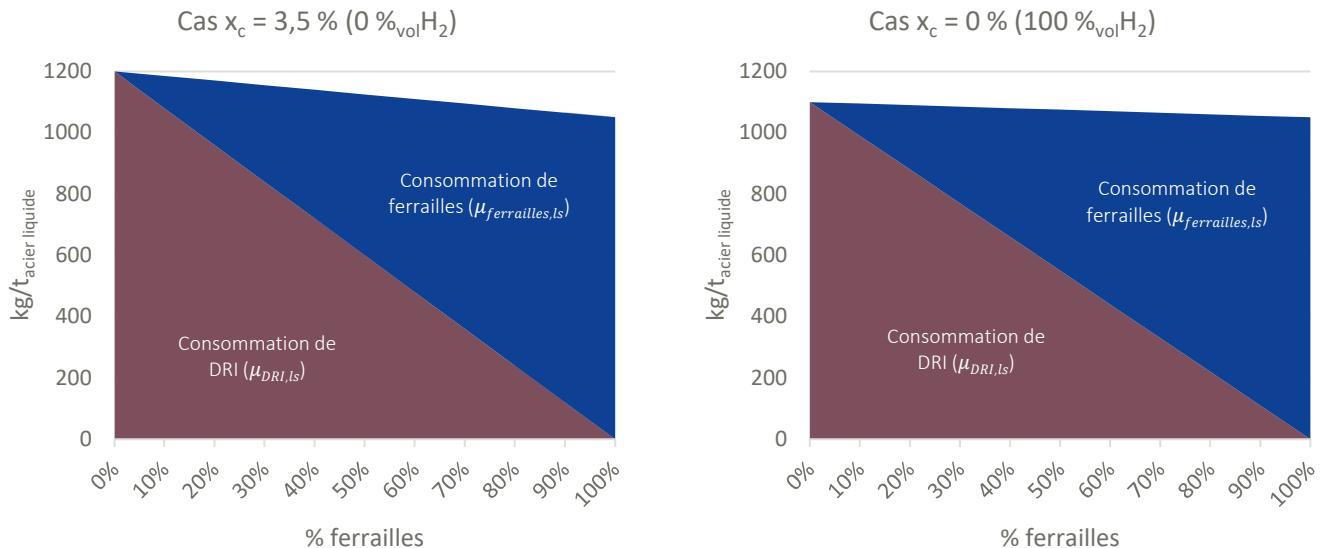


Figure 75: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation spécifique de DRI et de ferrailles par l'EAF en fonction du % ferrailles dans le cas $x_c = 3,5\%$ (à gauche) et dans le cas $x_c = 0\%$ (à droite).

Il a été supposé dans la modélisation qu'en cas de production de HBI pour vente à l'externe ou exportation, un système de briquetage du DRI en sortie du DRP serait nécessaire. Sur la base de L. Hooey et al. (2014) [148], il a été supposé qu'un tel système entraînerait une consommation électrique supplémentaire de 100 kWh/t_{HBI}.

Sur la base de E. Jacobasch et al. (2021) [149], l'hypothèse de coût d'investissement a été fixée à 303 EUR/t_{DRI.an} pour un réacteur DRP et à 240 EUR/t_{acier liquide.an} pour un nouveau four à arc électrique. Cette source a été privilégiée par rapport à d'autres car elle semblait plus proche des montants d'investissement effectivement constatés dans les nouveaux projets industriels. En plus de ce montant d'investissement, un taux d'intérêt de 7 % a été fixé.

3.5. Nouveaux procédés de fabrication de l'acier

3.5.1. Le smelting (HIsarna)

HIsarna est un procédé de réduction par fusion sans étape de fabrication de coke et d'agglomérés. Les matières premières (charbon, minerai de fer, chaux, etc.) peuvent être injectées directement dans le réacteur dans lequel la température est supérieure à la température de fusion du fer, le maintenant ainsi à l'état liquide. Dans la partie supérieure du réacteur (le « cyclone »), le minerai de fer qui y est injecté est déjà partiellement réduit, à hauteur d'environ 10-20 %, grâce aux gaz réducteurs et à l'environnement turbulent qui y règne (voir Figure 76). Une fois tombé dans le fond du réacteur, le fer liquide est réduit par le carbone contenu dans le charbon réduit en poudre [31].

S'il était mis en œuvre à l'échelle industrielle, le procédé HIsarna permettrait en théorie de réduire d'environ 20 % les émissions de CO₂ et les consommations énergétiques par rapport au haut fourneau conventionnel du fait de l'élimination de la cokerie et de l'agglomération [150]. De plus, le procédé peut intégrer des ferrailles et de la biomasse en substitution partielle du minerai de fer et du charbon permettant ainsi de réduire les émissions de CO₂ d'au moins 50 % par rapport à une production conventionnelle. Des essais avec environ 35 % de ferrailles et 40 % de biomasse ont déjà été réalisés avec succès [151]. Le procédé présente également l'avantage de pouvoir éliminer jusqu'à 90 % du phosphore contenu dans le minerai à travers le laitier. Le réacteur serait donc en théorie capable de fonctionner avec du minerai de fer à plus haute teneur en phosphore que ce qui serait normalement accepté dans un haut fourneau [31]. Enfin, le procédé génère par ailleurs un flux de CO₂ très concentré en sortie de réacteur ce qui le rend compatible avec le captage et stockage du carbone [151].

Un projet pilote a été mis en place en 2011 sur le site Tata Steel de IJmuiden, seul site sidérurgique intégré aux Pays-Bas. Ce pilote a été conduit avec succès et a démontré la possibilité de produire de la fonte liquide sur plusieurs heures. Un nouveau pilote de taille industrielle d'une capacité 10 fois plus grande que le premier sera construit à Jamshedpur, en Inde, pour un coût d'investissement estimé à 300 MEUR [31]. La technologie est à présent détenue à 100 % par le groupe Tata Steel et le projet étudie en plus à présent la possibilité de récupérer et recycler le zinc contenu dans les ferrailles galvanisées [151].

Cette technologie n'a pas été modélisée dans la trajectoire de décarbonation car jugée peu probable en France et parce qu'une autre solution avec capture du CO₂ (CCS sur TGR-BF) a déjà été prise en compte.

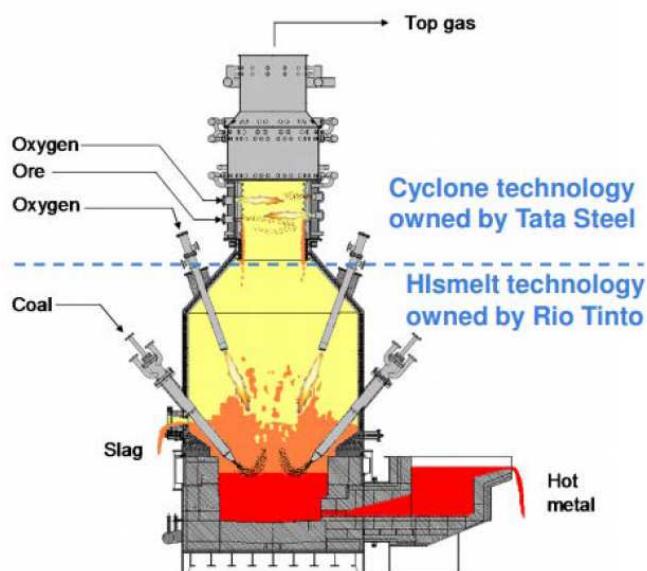


Figure 76: Schéma simplifié du procédé HIsarna avec CSC [31].

3.5.2. Electrolyse directe du fer

En dehors de l'hydrogène et de la voie DRI-EAF pour décarboner la production d'acier primaire, il existe également la voie de l'électrolyse directe du fer. Tout comme d'autres métaux tels que l'aluminium ou le lithium, le principe consiste à placer le minerai dans une solution (un électrolyte) et de faire circuler un courant électrique à travers afin de réduire les oxydes de fer. La réaction produit du fer métallique au niveau de la cathode ainsi que de l'oxygène au niveau de l'anode. Jusqu'à maintenant, ce procédé avait été écarté pour des raisons économiques et la principale difficulté technique rencontrée tient au choix des matériaux qui composent les électrodes. Ces matériaux doivent en effet pouvoir tolérer des conditions de température de plus 1 500 °C et ne pas se corroder au contact des espèces présentes dans l'électrolyte [147]. Aujourd'hui, deux voies principales sont explorées.

3.5.2.1. Electrolyse en milieu alcalin

Les procédés ULCOWIN et ULCOLYSIS reposent sur la réduction électrochimique des oxydes de fer. Dans le procédé ULCOWIN, le minerai de fer est dissous dans une solution électrolytique de soude (NaOH) à une température de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (voir Figure 77). Dans cette configuration, le fer réduit est obtenu à l'état solide et doit donc par la suite être mis en fusion dans un four à arc électrique [75]. Avec ce dispositif, du fer pur à 99,98 % a pu être obtenu mais à une vitesse de production très faible, environ 5 kg/jour. C'est pour surmonter cette difficulté que, dans le procédé ULCOLYSIS, le fer est dissous dans une solution électrolytique contenant des oxydes fondus à une température de $1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [31]. Pour être chargé dans le bain électrolytique, les matières premières doivent être préalablement broyées finement et la gangue doit être retirée par lixiviation avec une solution alcaline. La solution ainsi enrichie en oxydes de fer est circulée dans la cellule électrochimique. Lors de la décomposition, le fer se dépose sous forme solide à la cathode. Il est prélevé périodiquement pour ensuite être mis en fusion dans un four électrique, potentiellement en mélange avec des ferrailles [152].

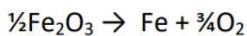
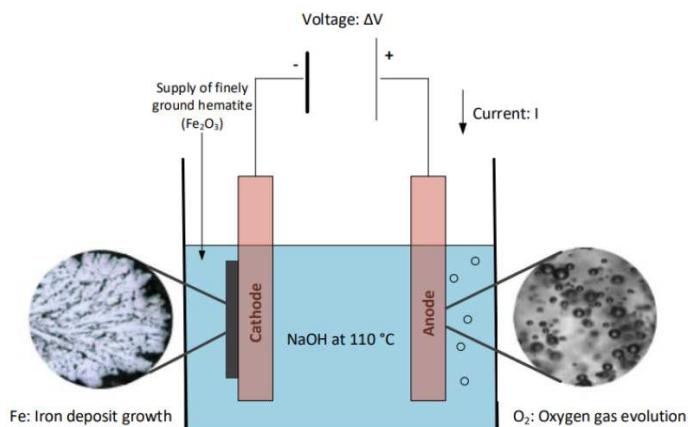


Figure 77: Schéma de principe de l'électrolyse du minerai de fer [31]

Le projet SIDERWIN porté par ArcelorMittal a reçu un financement du fonds européen Horizon 2020. La technologie est développée depuis 2004 et l'objectif, à travers le projet ULCOS, est de la porter à un TRL 6 en 2022 grâce à un démonstrateur [75]. Avant 2023, il semblait admis que la technologie n'atteindrait pas la maturité industrielle (TRL 9) avant 2040 [153]. Par rapport à la voie haut fourneau, l'électrolyse directe du fer telle que développée par SIDERWIN permettrait de réduire les émissions de CO_2 de 87 % et la consommation énergétique de 31 % [154].

Les résultats expérimentaux présentés en mars 2023 [155] montrent qu'un rendement Faraday de 90 % peut être atteint pour l'électrolyse de l'hématite (Fe_2O_3). Il est par ailleurs possible d'utiliser du minerai avec une forte concentration en magnétite (Fe_3O_4) ce qui suggère que des résidus métallurgiques riches en magnétite (tels que les résidus de bauxite) pourraient être utilisés en intrant de l'électrolyse. Toutefois, la présence d'impuretés non conductrices (principalement l'aluminium, le magnésium et le titane) a tendance à ralentir la réaction et à diminuer le rendement Faraday. Ainsi, malgré qu'il soit techniquement faisable d'utiliser des matières premières alternatives, les rendements Faraday sont relativement faibles : 30 à 50 % pour les résidus de bauxite, 10 à 40 % pour les boues ferrugineuses issues de la métallurgie du nickel, 20 à 30 % pour laitiers issus de la production de cuivre et de ferronickel. La seule exception semble la calamine dont l'électrolyse présente un rendement Faraday de 92 à 97 %. Ceci est dû à sa forte concentration en oxydes de fer et à sa faible part d'impuretés. Les tests ont également démontré que l'électrolyse pouvait fonctionner de manière variable et donc s'adapter à l'intermittence des énergies renouvelables. D'après M. Barberousse et al. (2020) [152], 92 % de la puissance électrique consommée pour l'électrolyse uniquement peut être rendue disponible (pas 100 % car certains auxiliaires doivent pouvoir rester en fonctionnement). A titre de comparaison, cette valeur est typiquement comprise entre 8 et 75 % pour les autres procédés industriels.

Lors de cette même présentation [155], le consortium SIDERWIN annonçait une mise à disposition de la technologie à l'échelle industrielle à horizon 2030 (voir Figure 78). Sur la base de ce calendrier, une hypothèse de disponibilité de la technologie à horizon 2030 a été faite dans la modélisation.

Roadmap for the industrialization of the iron electrowinning



Figure 78: Planning estimé de développement du projet SIDERWIN en mars 2023 [155].

D'après M. Barberousse et al. (2020) [152], la consommation électrique spécifique du procédé d'électrolyse SIDERWIN est de 2 720 kWh/t_{fer} (soit 2 693 kWh/t_{acier brut}) à laquelle il faut rajouter 66 kWh/t_{fer} (soit 65 kWh/t_{acier brut}) pour le broyage du minerai et 325 kWh/t_{fer} (soit 322 kWh/t_{acier brut}) pour la lixiviation. Enfin, il faut ajouter la consommation nécessaire à la fusion du fer solide dans un four à arc électrique soit environ 450 kWh/t_{acier brut}. Ces valeurs ont été retenues dans la modélisation. La puissance électrique a par ailleurs été estimée à 280 MW/Mt_{acier}.an pour l'électrolyse, le broyage et la lixiviation.

Le coût d'investissement d'une nouvelle usine d'électrolyse directe est estimé à environ 500 MEUR pour une capacité de production de 1 Mt/an, ce qui représente environ un quart du coût d'investissement pour une solution haut fourneau équivalente [75]. Il s'agit d'une estimation du montant pour une première unité industrielle qui comprend par ailleurs le coût du four à arc électrique (184 MEUR). Le montant de l'unité d'électrolyse seule peut donc être estimé à 316 MEUR pour une capacité de 1 Mt/an.

3.5.2.2. Electrolyse à sel fondu (MOE)

Dans l'électrolyse à sel fondu (MOE pour « Molten Oxide Electrolysis » en anglais), les oxydes de fer sont dissous à environ 1 600 °C dans un mélange d'oxydes comme de l'oxyde calcium (chaux, CaO) ou de l'oxyde de silicium (silice, SiO₂). Etant au-dessus du point de fusion, le fer est obtenu à l'état liquide dans ce procédé (voir Figure 79). L'entreprise Boston Metal fondée en 2013 travaille actuellement à son développement et annonce un déploiement commercial de la technologie à horizon 2026. Il est important de noter que le calendrier est particulièrement ambitieux car, outre les annonces de l'entreprise, il a été estimé que la technologie n'atteindra pas un TRL 9 avant 2050 [153]. Par ailleurs, en janvier 2023, le groupe ArcelorMittal a annoncé avoir investi 36 MUSD dans l'entreprise Boston Metal à travers son fond d'innovation XCarb® [156].

Les anodes à base d'iridium semblent être une piste prometteuse pour ce procédé [147]. La consommation électrique spécifique a été estimée à 4 100 kWh/t_{acier brut} tandis que le minimum théorique est lui estimé à 2 780 kWh/t_{acier} [147]. La technologie développée serait également en mesure de fonctionner avec n'importe quel grade de minerai de fer. Même s'il a été estimé que les coûts de R&D nécessaires pour atteindre un TRL 8 seraient de l'ordre de 1 Md EUR [75], aucun coût d'investissement n'a pu être trouvé pour cette technologie à ce stade. C'est la raison principale pour laquelle l'électrolyse en milieu alcalin (voir partie 3.5.2.1) a été retenue pour la modélisation de la technologie d'électrolyse directe du fer, quand bien même les annonces de l'entreprise Boston Metal laisseraient entendre que la technologie d'électrolyse à sel fondu (MOE) serait disponible avant. Il est également intéressant de noter que Boston Metal prévoit un fonctionnement modulaire permettant d'avoir des capacités installées allant de plusieurs milliers à plusieurs millions de tonnes d'acier par an.

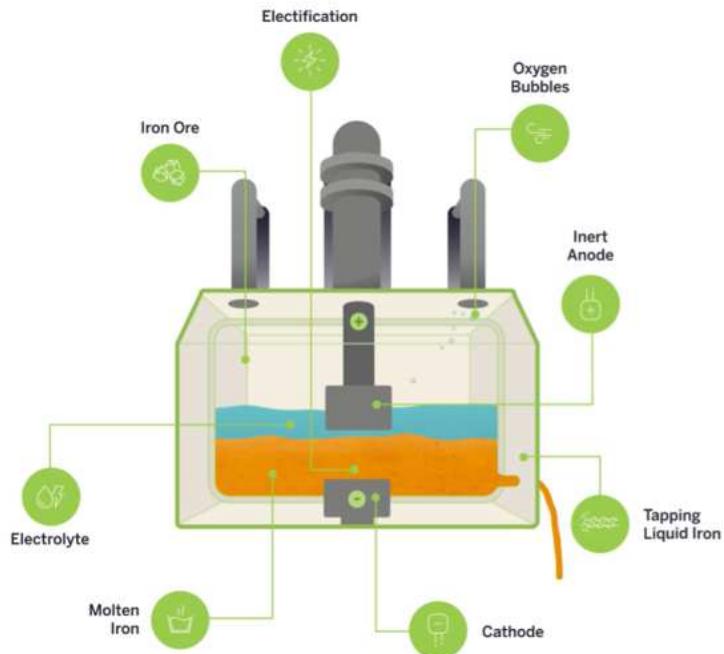


Figure 79: Schéma du procédé d'électrolyse à sel fondu (source : Boston Metal [157]).

3.5.2.3. Procédé ELECTRA

L'entreprise ELECTRA basée dans le Colorado qui a été fondée en 2020 travaille sur un nouveau procédé d'électrolyse directe du fer permettant d'opérer à 60 °C, soit une température bien plus faible comparée aux deux projets précédents permettant d'abaisser la consommation énergétique. Dans le concept développé par Boston Metal, la température doit être maintenue à 1 600 °C sans arrêt du process au risque de figer le métal en fusion et d'arrêter la production pendant plusieurs mois. Le fait que le procédé ELECTRA (au même titre que le procédé SIDERWIN) opère à une faible température lui permet de gagner en flexibilité en faisant du *stop-and-go* sur la production et ainsi consommer de l'électricité lorsque les prix sont bas. De plus, l'entreprise annonce qu'elle pourra consommer tout type de qualité de minerai de fer. ELECTRA n'a pas communiqué plus de détails sur le fonctionnement du procédé mais a annoncé une production commerciale à horizon 2026 [158], [159].

3.6. Première transformation

3.6.1. Procédés de première transformation

Une fois l'acier liquide obtenu et mis au titre désiré (c'est-à-dire à la bonne composition), il subit une série de transformations mécaniques et thermiques. A quelques nuances près, les étapes qui suivent sont semblables entre les trois principales voies de production d'acier (filière haut fourneau, filière électrique et filière DRI-EAF).

3.6.1.1. Coulée continue et train de laminage

La phase de coulée continue correspond à la mise en forme de l'acier et comporte plusieurs étapes et équipements. Les brames (pour la filière haut fourneau) et les blooms (pour la filière électrique) sont des semi-produits obtenus directement après le versement de l'acier sauvage dans des lingotières (voir Figure 80). L'acier est refroidi et se solidifie formant son propre moule tout au long de sa coulée guidée par une série de rouleaux jusqu'à atteindre une position horizontale. Les brames et blooms sont obtenus par découpe de la bande continue. Pour démarrer une séquence de coulées, un mannequin articulé en métal est d'abord introduit dans la lingotière. En se refroidissant autour de la pièce, l'acier s'ancre sur le mannequin, lequel peut ensuite être tiré et récupéré après découpe au bout du tunnel de rouleaux.

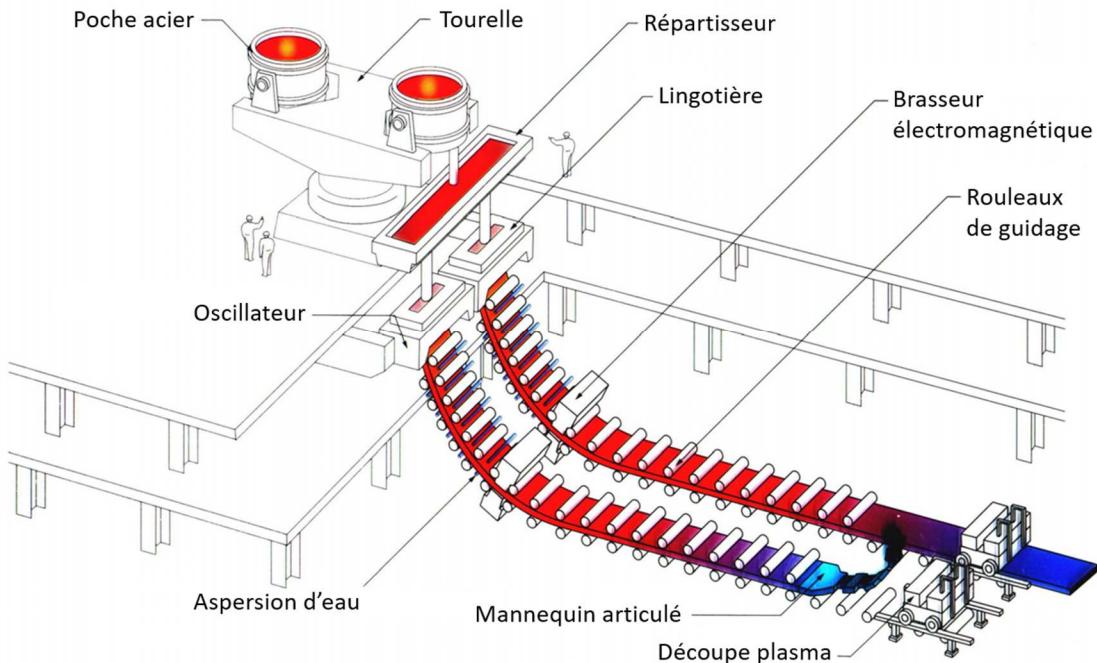


Figure 80: Schéma du procédé de coulée continue (reproduit à partir de R. Guthrie & M. Isac (2022) [160]).

Dans un second temps, les brames et blooms sont enfournées dans un four de réchauffage de préférence chaudes afin de limiter les pertes thermiques. Lorsque les semi-produits sont à température désirée, qui dépend de la nuance et du format de laminage, elles sont décrassées par des jets d'eau à haute pression afin de les débarrasser de la couche d'oxyde formée pendant le réchauffage puis elles passent par une série d'étapes de laminage jusqu'à obtenir les dimensions voulues. Dans le cas de la production de plaques, bandes ou tôles, les brames sont en général enroulées en bobines (dites « bobines à chaud » ou « hot rolled coils » en anglais) avant expédition. Les blooms sont en général directement mis sous forme de poutres, tubes et barres. Une étape supplémentaire de laminage à froid et de revêtement d'une couche superficielle protectrice de zinc ou d'étain peut être réalisée pour obtenir l'épaisseur finale souhaitée ainsi qu'une protection immédiate des tôles.

3.6.2. Modélisation de la première transformation

La modélisation de la première transformation est déjà incluse dans la modélisation des usines de référence (voir partie 3.2.2.5 pour la filière haut fourneau et partie 3.3.2 pour la filière électrique). La modélisation de la première transformation de l'usine de référence DRI-EAF est en fait la même que pour celle de l'usine de référence haut fourneau.

3.6.3. Technologies de décarbonation de la première transformation

3.6.3.1. Brûleurs régénératifs

Les brûleurs régénératifs peuvent s'appliquer également sur les fours de réchauffage des semi-produits et les fours de traitements thermiques (voir partie 3.3.3.2.5). Pour ces étapes-là, il a été fait l'hypothèse que la mise en place de brûleurs régénératifs permettait de réduire la consommation spécifique de gaz naturel de 40 % par rapport à des brûleurs à air froid.

3.6.3.2. Brûleurs oxy-fuel

Les brûleurs oxy-fuel peuvent s'appliquer également sur les fours de réchauffage des semi-produits et les fours de traitement thermique (voir partie 3.3.3.2.6). Pour ces étapes-là, il a été fait l'hypothèse que la mise en place de brûleurs oxy-fuel permettait de réduire la consommation spécifique de gaz naturel de 35 % par rapport à des brûleurs à air froid.

Entre 2005 et 2007, l'installation de brûleurs oxy-fuel sur les fours pits du site d'Ascométal Fos-sur-Mer aurait permis de réduire sa consommation énergétique spécifique et ses émissions de NOx de 40 % sur cette partie-là du procédé. Le site d'Ascométal Les Dunes aurait fait de même entre 2007 et 2008 sur quatre de ses fours pits [114].

3.6.3.3. L'enfournement à chaud

D'après M. Samanian et al. [161], l'énergie nécessaire au réchauffage des semi-produits lorsque la charge est à température ambiante est de 1170 kJ/kg. Celle-ci est réduite à 680 kJ/kg d'énergie quand les produits sont chargés à chaud (à une température de 660 °C) soit environ 40 % de réduction sur la consommation d'énergie. Même si cela peut être considéré comme une technique déjà applicable sur des usines existantes, le gain d'énergie par l'enfournement à chaud démontre l'intérêt d'optimiser l'ensemble de la chaîne de production de telle façon que les étapes de fusion, de coulée et de mise en

forme finale de l'acier soient réalisées sur un seul et même site. S'agissant là plus d'une méthode opérationnelle que d'une technologie et sachant que de nombreux sites sidérurgiques la mettent déjà en pratique, celle-ci n'a pas été modélisée dans les trajectoires de décarbonation. A moins que l'usine présente des contraintes logistiques (ex. étape de laminage réalisée sur un autre site) ou de planning de production obligeant à un stockage temporaire (et donc un refroidissement) des semi-produits, l'enfournement à chaud est pratiqué systématiquement. Ce rapport ne fait que mentionner son intérêt et les gains qu'elle peut représenter.

3.6.3.4. L'électrification totale ou partielle des procédés de laminage

Le laminage à chaud requiert de monter à des températures proches de 1300 °C tandis qu'à ce jour, les techniques courantes d'électrification permettent d'atteindre au maximum des températures d'environ 1000 °C. Cependant, la mise en place de fours hybrides permettrait de limiter l'usage de combustibles fossiles pour dépasser les limites de l'électrique. Les fours de réchauffages des semi-produits peuvent être échelonnés dans les températures de consigne au niveau des brûleurs successifs, permettant ainsi de chauffer progressivement les produits et de manière contrôlée. De ce fait, il est techniquement possible d'électrifier les premiers brûleurs à gaz pour lesquels la température de consigne est la plus faible, jusqu'à environ 1000-1100 °C. Le fait d'hybrider un usage thermique de cette façon permet également à l'industriel de gagner en flexibilité et de se prémunir en partie du risque sur l'approvisionnement de l'un des deux vecteurs énergétiques. L'équation économique peut se révéler avantageuse dans la mesure où le rendement électrique est généralement plus élevé que le rendement de combustion du gaz naturel pour le chauffage des demi-produits ce qui a tendance à amortir le surcoût lié à l'électricité. De plus, il est envisageable pour les industriels de tirer un revenu supplémentaire à travers un contrat de flexibilité passé avec le gestionnaire de réseau : l'industriel est payé pour s'effacer temporairement du réseau lors de certains pics de consommation ce qui offre de la réserve de stabilité pour le gestionnaire.

3.6.3.5. Combustion directe d'hydrogène

La combustion directe d'hydrogène peut s'appliquer également aux fours de réchauffage des semi-produits (voir partie 3.3.3.3.4).

3.6.3.6. Captage du CO₂ sur le laminage

Du fait de ses besoins en chaleur pour le réchauffage des demi-produits, le laminage à chaud constitue une petite part des émissions de CO₂ d'un site sidérurgique et, tout comme sur d'autres procédés industriels, il peut être envisagé de capter ce CO₂. Pour les industriels, cette solution d'abattement est intéressante car il peut être techniquement compliqué et coûteux d'électrifier ce procédé. Toutefois, le CO₂ issu de ce procédé se trouve à une concentration relativement faible : d'environ 10 % d'après J.K. Pandit et al. (2020) [162], de 4,6 % d'après IEAGHG (2013) [57] ou encore de 6,7 % dans l'étude de F. Zhang et al. (2018) [163].

La modélisation du captage du CO₂ issu des fours de réchauffage se base sur le travail de F. Zhang et al. (2018) [163], qui étudie un système de captage par postcombustion aux solvants ce qui est standard pour des concentrations de CO₂ aussi faibles. L'étude identifie un fort potentiel de récupération de chaleur fatale au niveau de l'étape de laminage (chaleur contenue dans les gaz de combustion à environ 650 °C et celle issue des brames). Cette chaleur peut être valorisée pour combler une part importante des besoins thermiques pour la régénération du solvant aux amines. Pour un taux de captage de 90 %, la demande énergétique du système est de 3,67 GJ/tCO₂. Le CO₂ ainsi capté se trouve à une concentration de 98,4 %. Pour être conforme avec le transport de CO₂ par bateau (qui nécessite d'être à une concentration supérieure à 99,9 %), il a été supposé qu'une dernière étape de purification par distillation cryogénique serait utilisée. Ainsi, sur la base de l'étude de l'IEAGHG (2013) [57], il a été supposé que la consommation électrique supplémentaire serait de 170 kWh/tCO₂ pour le captage par cryogénie et de 195 kWh/tCO₂ pour sa compression à 110 bars, soit une consommation électrique totale de 365 kWh/tCO₂. Sur la base des résultats de A. Haglund (2020) [164], un coût d'investissement de 186 USD/tCO₂ capté.an (soit 155 EUR/tCO₂ capté.an⁴¹) pour la technologie de captage a été retenu.

F. Zhang et al. (2018) [163] précise que la chaleur fatale issue des brames peut ne pas être suffisante pour combler cette demande énergétique lorsque la quantité de brames stockée et en refroidissement diminue. Dans ce cas, le système de captage a besoin d'un apport thermique externe supplémentaire et l'étude conclut que si du gaz de cokerie est utilisé pour combler ce déficit, cela conduirait indirectement à émettre 26,5 % du CO₂ capturé (soit 0,265 kgCO₂ pour chaque tonne de CO₂ captée) ce qui reste relativement limité. L'étude ne précise toutefois pas à quelle fréquence annuelle cet apport externe pourra être nécessaire. Par simplification, il a donc été supposé que les besoins thermiques du système de captage pourront être entièrement couverts par de la récupération de chaleur fatale. Bien que cette hypothèse puisse sembler ambitieuse, il est important de noter que le captage du CO₂ sur le poste de laminage n'interviendra pas avant 2030-2040 dans l'exercice de prospective, laissant ainsi du temps aux techniques de s'améliorer. A ce titre, le projet DMX sur le site d'ArcelorMittal Dunkerque est un démonstrateur qui étudie un solvant dont la régénération entraînerait une consommation énergétique de

⁴¹ Hypothèse taux de change : 1 EUR = 1,2 USD

l'ordre de 2,3 à 2,9 GJ/tCO₂, soit environ 30 % inférieure à l'hypothèse retenue de 3,67 GJ/tCO₂. A noter que seuls les sites de haut fourneau sont supposés être concernés par la technologie de captage du CO₂ sur laminage dans les trajectoires de décarbonation. Les sites de four à arc électrique ont été à première vue écartés car ils représentent individuellement un volume d'émissions trop faible et la plupart ne sont pas favorablement localisés pour avoir accès à une zone de stockage.

Le déploiement du captage sur le laminage à chaud est piloté dans la modélisation par un taux de pénétration, compris entre 0% et 100% et défini par la variable *pénétration_CCS_laminage*.

Commodité	Unité	Valeur d'origine /t _{bobine}	Nouvelle valeur /t _{bobine}
CO2	tCO2	Bilan carbone	SELF + 0,9 · pénétration_CCS_laminage
CO2 capté	tCO2	-	- 0,9 · pénétration_CCS_laminage

Tableau 24: Effet du captage de CO₂ sur le laminage sur la modélisation entrée-sortie de la coulée continue et du laminage à chaud.

Commodité	Unité	Valeur d'origine /t _{CO2} capté	Nouvelle valeur /t _{CO2 capté}
Électricité	kWh	-	- 365 · pénétration_CCS_laminage

Tableau 25: Modélisation entrée-sortie du captage de CO₂ sur le laminage⁴².

3.7. Bilan des technologies de décarbonation

3.7.1. Revue de littérature des coûts d'investissement dans la filière primaire

Le Tableau 26 ci-dessous résume l'ensemble des coûts d'investissements pour les technologies de décarbonation de la filière primaire (haut fourneau et DRI). Ce travail de balayage de la littérature sur le sujet permet de confronter les sources et d'obtenir des ordres de grandeur réalisistes de montants d'investissement. Les hypothèses de coût qui ont *in fine* été prises dans la modélisation par technologie de décarbonation sont indiquées dans chaque sous-partie concernée.

Technologie	Description	Coût total d'investissement	Coût unitaire d'investissement	Sources
TGR-BF	TGR-BF : recirculation des gaz de gueulard dans le haut fourneau (voir partie 3.2.3.3.4).	100 MEUR (capacité de 2 Mt _{fente.an})	50 EUR/t _{fente.an}	N. Pardo et al. (2012) [105]
		220 MEUR (capacité de 2 Mt _{fente.an})	110 EUR/t _{fente.an}	M. de Santis et al. (2021) [75]
Nouveau four à arc électrique	Pas de description précise.	368 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier liquide.an})	184 EUR/t _{acier liquide.an}	A. Krüger et al. (2020) [165]
		186 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier liquide.an})	111,43 USD/t _{acier.an} ≈ 93 EUR/t _{acier.an}	S. Baig (2016) [166]
		442 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier liquide.an})	265,79 USD/t _{acier liquide} ≈ 221 EUR/t _{acier liquide}	M. Son et al. (2020) [167]
		266 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier liquide.an})	160 USD/t _{acier liquide.an} ≈ 133 EUR/t _{acier liquide}	V. Vogl et al. (2018) [138]
	Cout total de l'investissement pour un four à arc électrique qui inclut le coût de construction et de mise en route de l'outil industriel.	480 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier liquide.an})	240 EUR/t _{acier liquide.an}	E. Jacobasch et al. (2021) [149]

⁴² La consommation d'électricité pour 1 tonne (positive) de CO₂ capté est négative car le flux de CO₂ capté prend par convention une valeur négative, étant donné qu'il s'agit d'un flux sortant et non entrant. La quantité d'électricité consommée est donc, en pratique, bien positive pour -1 t de CO₂ capté.

DRI – MIDREX	Pas de description précise.	240 MEUR (capacité de 1 Mt _{DRI.an})	240 EUR/t _{DRI.an}	A. Krüger et al. (2020) [165]
		250 MEUR (capacité de 1 Mt _{DRI.an})	250 EUR/t _{DRI.an}	N. Pardo et al. (2012) [105]
		164 MEUR (capacité de 1 Mt _{DRI.an})	196,33 USD/t _{acier.an} ≈ 164 EUR/t _{acier.an} ⁴³	S. Baig (2016) [166]
DRI - HYL	Pas de description précise.	350 MEUR (capacité de 2 Mt _{DRI/an})	175 EUR/t _{DRI.an}	N. Pardo et al. (2012) [105]
	Coût total de l'investissement pour un four de réduction direct qui inclut le coût de construction et de mise en route de l'outil industriel.	606 MEUR (capacité de 2 Mt _{DRI/an})	303 EUR/t _{DRI.an}	E. Jacobasch et al. (2021) [149]
Usine intégrée DRI - EAF	Nouvelle usine greenfield avec un usage flexible de gaz naturel et d'hydrogène.	10 000 MEUR (capacité de 7,5 Mt _{acier.an})	1 333 EUR/t _{acier.an}	JRC (2018) [139]
	Coût basé sur le procédé MIDREX au gaz naturel. V. Vogl et al. (2018) [138] fait l'hypothèse que ce coût est le même pour une usine fonctionnant à l'H ₂ .	828 MEUR (capacité de 2 Mt _{acier.an})	230 (DRI) + 184 (EAF) = 414 EUR/t _{acier.an}	M. Wörtler et al. (2013) [168]
Electrolyseur H ₂	Electrolyse alcaline (AEL) qui inclut l'équipement, les stacks, convertisseur AC/DC.	-	800 EUR/kW en 2020 580 EUR/kW en 2030	A. Krüger et al. (2020) [165]
		-	848 EUR/kW en 2020 383 EUR/kW en 2050	E. Jacobasch et al. (2021) [149]
	Electrolyse PEM (PEMEL) qui inclut l'équipement, les stacks, convertisseur AC/DC.	-	1287 EUR/kW en 2020 296 EUR/kW en 2050	E. Jacobasch et al. (2021) [149]
	Electrolyse par oxyde solide (SOEL) qui inclut l'équipement, les stacks, convertisseur AC/DC, échangeurs de chaleur et condenseurs.	-	2 000 EUR/kW en 2020 1 000 EUR/kW en 2030	A. Krüger et al. (2020) [165]
Injection d'H ₂ dans le HF	Adaptation des tuyères d'injection au shaft, électrolyseur.	150 MEUR (capacité de 2 Mt _{fente/an})	75 EUR/t _{fente.an}	M. de Santis et al. (2021) [75]
Injection de GN dans le HF	Adaptation des tuyères d'injection au shaft.	10 MEUR (capacité de 2 Mt _{fente/an})	5 EUR/t _{fente.an}	M. de Santis et al. (2021) [75]
Préchauffage de la ferraille	Utilisation de la chaleur fatale du four à arc électrique pour préchauffer la ferraille.	3,2 MUSD ≈ 2,7 MEUR (capacité de 0,5 Mt _{acier/an})	5,3 EUR/t _{acier.an}	EPA (2012) [106]
CSC	Pas de description précise.	107 MEUR (capacité de 1 Mt _{fente/an})	107 EUR/t _{fente.an}	N. Pardo et al. (2012) [105]
	Captage et compression du CO ₂ . Technologie de captage en postcombustion par solvant MDEA/PZ avec OBF et TGR.	579 MEUR (capacité de 4 Mt _{acier/an})	137 EUR/t _{acier.an}	L. Hooey et al. (2013) [169]

⁴³ Hypothèse taux de change : 1 EUR = 1,2 USD

	Captage et compression du CO ₂ . Technologie de captage en postcombustion (captage du CO ₂ de cokerie, des cowpers, du four à chaux et de la centrale de production de vapeur).	242 (centrale thermique et production de vapeur) + 917 (équipements de captage) MUSD = 1 159 MUSD ≈ 966 MEUR (capacité de 3,9 Mt _{fondre} /an)	248 EUR/t _{acier.an}	IEAGHG (2013) [57]
	Captage et compression du CO ₂ . Technologie de captage en postcombustion avec OBF et solvant MDEA.	306 (centrale thermique, production de vapeur et ASU) + 578 (équipements de captage) MUSD = 884 MUSD ≈ 737 MEUR (capacité de 3,9 Mt _{fondre} /an)	189 EUR/t _{acier.an}	IEAGHG (2013) [57]
	Captage et compression du CO ₂ sur TGR-BF. Investissement supplémentaire à réaliser une fois le TGR-BF déjà mis en place.	160 MEUR (capacité de 4 Mt _{fondre.an})	40 EUR/t _{fondre.an}	M. de Santis et al. (2021) [75]

Tableau 26: Comparaison des coûts d'investissement des leviers de décarbonation de la filière primaire.

3.7.2. Bilan des données technico-économiques de la filière électrique

Le Tableau 27 ci-dessous résume l'ensemble des hypothèses technico-économiques utilisées pour modéliser les technologies de décarbonation de la filière électrique, ainsi que les sources associées.

	Etape de procédé	Source d'énergie / émissions de procédé	Hypothèse impact	Hypothèse CAPEX	Sources
Traitement et nettoyage des ferrailles	Four à arc électrique	Electricité	- 50 kWh/t _{acier liquide}	1 250 EUR/kt _{acier}	Hypothèses ADEME sur la base d'entretiens et de sources confidentielles
Digitalisation	Four à arc électrique	Electricité	- 15 kWh/t _{acier liquide}	1 670 EUR/kt _{acier}	Hypothèses ADEME sur la base de sources confidentielles
Brassage électromagnétique	Four à arc électrique	Total énergie	- 4 %	2 000 EUR/kt _{acier}	Sources confidentielles ABB review 3/2015 [103]
		Electrode en graphite	- 5 %		
Préchauffage de la ferraille	Four à arc électrique	Electricité	- 25 kWh/t _{acier liquide}	4 600 EUR/kt _{acier}	Sources confidentielles N. Pardo et al. (2012) [105] EPA (2012) [106]
		Electrode en graphite	- 40 %		
Amélioration de l'étanchéité du four électrique	Four à arc électrique	Electricité	- 20 kWh/t _{acier liquide}	1 500 EUR/kt _{acier}	Hypothèses ADEME sur la base de sources confidentielles
Brûleurs régénératifs	Four de réchauffage	Gaz naturel	- 40 %	8 300 EUR/kt _{acier}	Hypothèses ADEME sur la base de sources confidentielles
	Traitements thermiques	Gaz naturel	- 40 %		
Brûleurs oxy-fuel	Préchauffage des poches	Gaz naturel	- 35 %	5 600 EUR/kt _{acier}	N. Pardo et al. (2012) [105] J. von Schéele (2010) [114]
	Four de réchauffage	Gaz naturel	- 35 %		
	Traitements thermiques	Gaz naturel	- 35 %		

Fours à arc électrique à courant continu	Four à arc électrique	Electricité	- 70 kWh/t _{acier liquide}	5 170 EUR/kt _{acier}	Sources confidentielles E. Worrel et al. (2009) [111]
	Four à arc électrique	Electrode en graphite	- 50 %		
Fours à induction	Four de réchauffage	Gaz naturel	- 100 %	590 EUR/MWh de gaz naturel économisé	Hypothèses ADEME sur la base de sources confidentielles
		Electricité	+ 450 kWh/t		
	Traitements thermiques	Gaz naturel	- 100 %		
		Electricité	+ 225 kWh/t		
Pompes à vide pour VOD	Métallurgie secondaire	Gaz naturel	- 40 kWh/t _{acier liquide}	11 200 EUR/kt _{acier}	Hypothèse ADEME sur la base de sources confidentielles
		Electricité	+ 2 kWh/t _{acier liquide}		
Combustion directe d'hydrogène en substitution du gaz naturel	Préchauffage des poches	Gaz naturel	- 100 %	-	Hypothèse ADEME sur la base d'entretiens et de sources confidentielles
	Four de réchauffage	Gaz naturel	- 100 %		
	Traitements thermiques	Gaz naturel	- 100 %		
	Ensemble usine	Electricité	Production d'hydrogène par électrolyse : 56 kWh _e /kg _{H2}		
Recarbonatation des laitiers	Captage et utilisation	Total émissions directes	53 kgCO ₂ /t _{laitier}	-	S. Kombathula (2020) [123]
Changement d'agent réducteur	Four à arc électrique	Anthracite, coke et autres sources de carbone	30 % de substitution max, 50 % de carbone biogénique	-	Sources confidentielles S. Devasahayam et al. (2019) [127] E. Worrel et al. (2010) [111]

Tableau 27: Synthèse des hypothèses technico-économique des leviers de décarbonation de la filière électrique.

Le Tableau 28 ci-dessous présente l'impact des technologies de décarbonation de la filière électrique sur la consommation d'électricité et sur les émissions de CO₂ à l'échelle d'un site. Contrairement au tableau précédent, il s'agit là plus d'un tableau de résultats par levier de décarbonation.

Technologie	Méthodes	Description		
Efficacité énergétique	Brûleurs régénératifs	Récupération de la chaleur des gaz de combustion pour préchauffer l'air et le combustible	-	- 19%
	Brûleurs oxyfuel	Brûleur fonctionnant avec de l'oxygène pur au lieu de l'air, réduisant les émissions NOx et la consommation		- 4%
	Brassage électromagnétique	Création d'un mouvement de convection dans le bain d'acier fondu pour accélérer la fusion et réduire la consommation d'électrodes	- 3%	- 3%
	Nettoyage des ferrailles	Élimination des impuretés des ferrailles pour réduire les pertes de chaleur	- 6%	-
	Préchauffage des ferrailles	Chauffage de la ferraille pour diminuer le temps de fusion	- 3%	
	Étanchéité du four	Réduction des pertes de chaleur et réactions parasites	- 2%	
	Digitalisation du procédé	Optimisation numérique du procédé	- 2%	
Électrification	Résistances électriques	Usage de résistances électriques plutôt que de fours au gaz naturel pour le réchauffage des demi-produits	+ 31%	- 48%
	Hydrogène électrolytique	Combustion d'hydrogène plutôt que de gaz naturel pour le réchauffage des demi-produits	+ 57%	

	Four à induction	Chaussage des produits métalliques par induction pour les traitements thermiques lors du laminage (filière IFA)	+ 22%	- 21%
	Pompes à vide	Électrification de la production de vide, fonctionnant via gaz naturel, dans les systèmes de décarburation VOD pour l'acier inox (filière IFA)	+ 0,2%	- 3%
Substitution de déchets plastiques au charbon		Valorisation de déchets plastiques, aux pouvoirs calorifique et réducteur plus élevés que le charbon		- 19%
Recarbonatation des laitiers		Captage du CO ₂ et mise en réaction avec les minéraux de laitiers pour former des carbonates solides		- 4%

Tableau 28: Impact des leviers de décarbonation de la filière électrique sur la consommation d'électricité et les émissions de CO₂.

3.8. Coût de production de l'acier

Selon la voie de production, la répartition des coûts de production diffère. L'acier recyclé est fortement dépendant du coût de la ferraille, et dans une moindre mesure, du prix de l'énergie. Pour l'acier primaire, les principaux coûts sont les intrants matière comme le charbon et le minerai de fer.

Une étude du JRC publiée en 2020 [170] portant sur 153 sites de production d'acier de l'Union Européenne et dix autres pays extérieurs a permis de caractériser des coûts de production moyens pour l'industrie sidérurgique. La Figure 81 présente les coûts de production moyen d'acier pour l'Europe des 27 (EU27) en 2019 pour les deux filières hauts fourneaux (BF-BOF) et fours à arc électrique (EAF) avec comme proxy la production de bobines laminées à chaud et de fil machine. Les coûts sont décomposés selon cinq postes :

- Les **matières premières** constituent de loin le premier poste de dépenses (entre 60 et 70 %). Ce poste inclut l'achat de minerais de fer, de charbon à coke, de charbon d'injection, de gaz naturel d'injection, de chaux, de ferrailles, de métaux d'ajout et de ferroalliages.
- Le poste « **énergie** » qui concerne l'achat d'électricité et de gaz naturel.
- Le poste « **main d'œuvre** ».
- Le poste « **crédits** » qui constitue en fait les économies potentielles réalisées par le recyclage de ferrailles ou la production d'énergie sur site par exemple.
- Le poste « **autres** » qui inclut l'achat d'autres matériaux consommables comme des agents fondants, des réfractaires, des électrodes ou encore des coûts liés à l'amortissement du capital ou au coût du carbone.

Au total, le coût de production des sidérurgistes européens en 2019 est estimé entre 450 et 500 EUR/t_{acier} sans distinction significative entre filière de production. A noter toutefois que ces chiffres reflètent uniquement le contexte européen et le constat peut s'avérer très différent dans d'autres régions du monde, en particulier là où la différence de coût entre l'électricité et le charbon est importante.

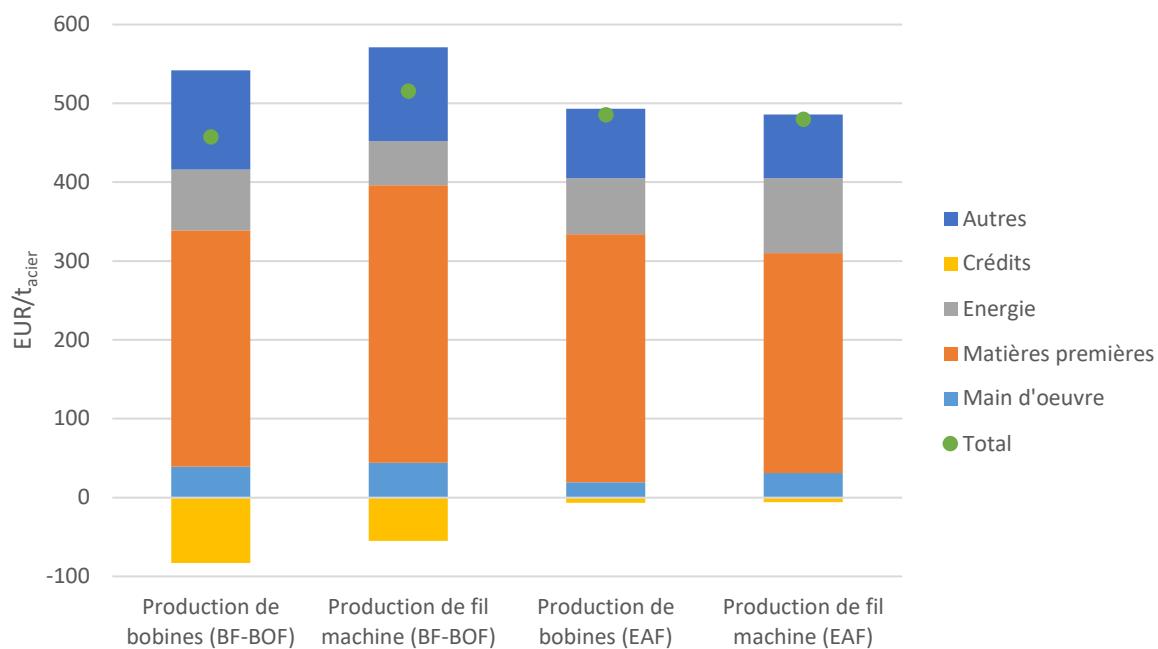


Figure 81 : Coûts de production moyens de bobines et de fil machine en acier en EU27 en 2019 [170].

En comparaison avec d'autres pays externes à l'Union Européenne comme la Chine, la Russie ou le Brésil, le coût de production en EU27 est souvent plus élevé. D'une manière générale, le coût de la main d'œuvre et des matières premières sont les deux postes qui affectent le plus la compétitivité de l'industrie sidérurgique européenne par rapport à d'autres régions du monde [170]. C'est également ce que révèle un rapport publié en 2022 [171] dont la conclusion est illustrée sur la Figure 82. Cette dernière permet de constater la hausse spectaculaire du coût de production moyen de l'acier en 2021 dans tous les grands pays producteurs (de l'ordre de 50 %) du fait de la hausse des prix de l'énergie cette année-là, ainsi que l'écart de coût de production entre les pays. En 2021, la différence entre les deux extrêmes (qui se trouvent être l'Inde / Russie et l'Allemagne au sein de l'échantillon de pays sélectionnés) était de 46 % pour la filière haut fourneau et de 36 % pour la filière électrique.

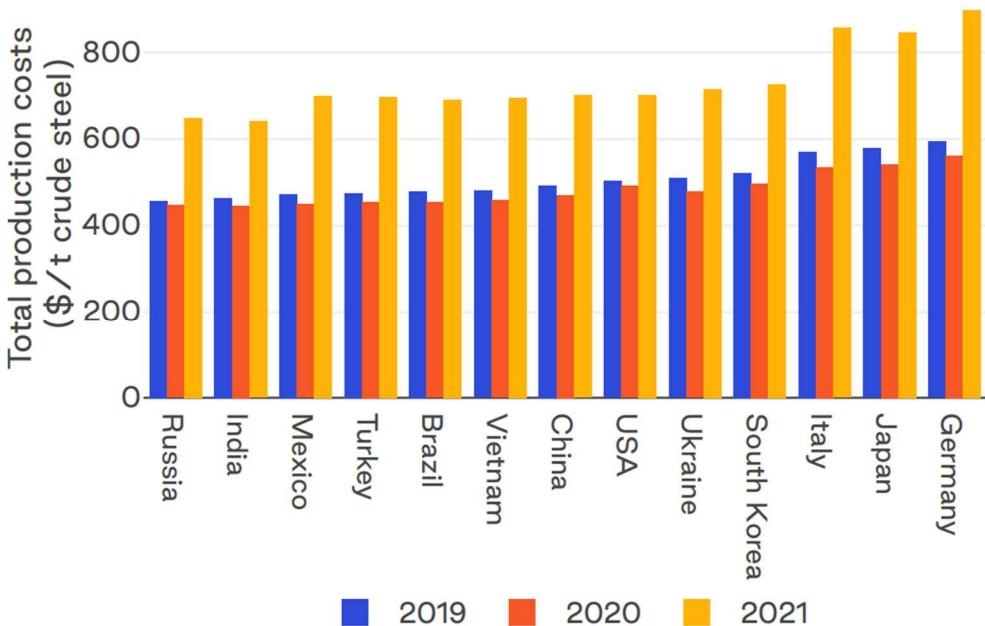


Figure 82 : Coût de production moyen de l'acier dans différents pays, 2019-2021 [171].

Dans la modélisation du parc sidérurgique français, le coût de production de la filière fonte a été construit à partir :

- Des consommations spécifiques d'intrants énergie et matière issues des usines de référence.
- Des hypothèses de prix d'achat de toutes les commodités (charbon, minerai de fer, etc.)
- Des hypothèses de prix de vente des co-produits que sont le laitier granulé de haut fourneau, le laitier d'aciérie, ainsi que les goudrons et le benzol produits à la cokerie.
- Une trajectoire de baisse des quotas gratuits alloués dans le cadre du marché EU-ETS.
- Des hypothèses sur les coûts opérationnels fixes (main d'œuvre, maintenance, gestion, etc.)
- Une hypothèse sur le montant des amortissements qui est répercuté dans le coût de production et qui dépend des investissements passés (poste « CAPEX amorti »).

Pour les années 2015-2021, le prix d'achat des commodités a été calculé sur la base des valeurs marchandes et des quantités importées en France disponibles via les données des douanes⁴⁴. De la même façon, le prix de vente des co-produits (goudrons, benzol et laitiers) a été calculé sur la base des valeurs marchandes et des quantités exportées de France. Les valeurs de prix estimées sont cohérentes avec les autres données disponibles dans la littérature [57], [133], [137], [138], [149], [172]. En plus de ces achats, des hypothèses ont été prises sur le coût du transport du minerai fer (principalement en provenance du Brésil et du Canada) ainsi que des différents types de charbon sur la base de IEAGHG (2013) [57]. Enfin, les hypothèses concernant les autres coûts fixes et coûts variables (main d'œuvre, consommables, maintenance ...) ont également été prises sur la base de IEAGHG (2013) [57]. Quant au coût du CO₂, il a été reconstitué à partir du prix moyen du CO₂ sur le marché EU-ETS ainsi que sur la part des émissions couvertes par des quotas gratuits au périmètre filière fonte en France. Il est ainsi supposé que tous les quotas manquants et nécessaires pour couvrir les émissions sont achetés sur le marché EU-ETS.

⁴⁴ Données accessibles via le site Trade Map : <https://www.trademap.org/Index.aspx>

Catégorie	Poste	Unité	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Description/source
Matières premières et énergie	Minerai de fer	EUR/t	49	51	72	72	90	94	145	Prix moyen à l'import, codes douaniers 260111 et 260112
	Transport de minerai	EUR/t	15	15	15	15	15	15	15	Hypothèse ADEME sur la base de IEAGHG (2013) [57]
	Houille ⁴⁵	EUR/t	88	84	128	129	140	102	126	Prix moyen à l'import, code douanier 2701
	Charbon à coke	EUR/t	100	104	207	183	187	129	145	Prix moyen à l'import, code douanier 27011210
	Anthracite	EUR/t	107	105	147	144	153	143	149	Prix moyen à l'import, code douanier 270111
	Transport du charbon	EUR/t	25	25	25	25	25	25	25	Hypothèse sur la base de IEAGHG (2013) [57]
	Castine	EUR/t	22	24	22	21	18	21	23	Prix moyen à l'import, code douanier 252100
	Chaux	EUR/t	88	89	87	92	93	89	95	Prix moyen à l'import, code douanier 2522
	Dolomie calcinée	EUR/t	131	134	131	141	163	175	204	Prix moyen à l'import, code douanier 251820
	FeMnC	EUR/t	889	832	1 356	1 195	1 133	933	1 357	Prix moyen à l'import, codes douaniers 720211 et 720219
	FeSi-75	EUR/t	1 164	970	1 162	1 412	1 121	1 030	1 457	Prix moyen à l'import, code douanier 720221
	Aluminium	EUR/t	2 807	2 144	2 473	2 601	2 410	2 173	3 212	Prix moyen à l'import, code douanier 7605
	Ferrailles	EUR/t	225	225	250	325	250	250	400	Estimation sur la base de S&P Global [173] et de Steelonthenet [174]
	Gaz naturel	EUR/MWh	30	30	30	30	30	30	30	Hypothèses ADEME sur la base de P. Cavaliere et al. (2022) [133], K. Benavides et al. (2022) [137]
	Électricité réseau	EUR/MWh	60	60	60	60	60	60	60	
	Fioal domestique	EUR/MWh	70	70	70	70	70	70	70	
Autres coûts variables	Consommables et autres utilités (réfractaires, électrodes, eau ...)	EUR/t _{acier}	9	9	9	9	9	9	9	Hypothèse sur la base de IEAGHG (2013) [57]
	Coûts divers (logistique, ingénierie, traitement des déchets ...)	EUR/t _{acier}	14	14	14	14	14	14	14	
Coût du carbone	Prix du CO ₂ sur le marché EU-ETS	EUR/tCO ₂	6	5	5	15	24	24	55	Estimation sur la base de Carbon Price Viewer [175]
	% des émissions couvertes par des quotas gratuits	%	84 %	83 %	73 %	76 %	75 %	94 %	84 %	Estimation sur la base de données EU Transaction Log [176]
	Coût du CO ₂ dans le coût de production	EUR/t _{acier}	2	2	3	7	11	3	17	Calcul à partir des données précédentes et des émissions spécifiques de l'usine de référence
Coûts fixes	Frais de maintenance	EUR/t _{acier.an}	26	26	26	26	26	26	26	Hypothèse sur la base de IEAGHG (2013) [57]
	Main d'œuvre	EUR/t _{acier.an}	38	38	38	38	38	38	38	
	Sous-traitance et frais de gestion	EUR/t _{acier.an}	14	14	14	14	14	14	14	
	CAPEX amorti	EUR/t _{acier.an}	30	30	30	30	30	30	30	
Vente de co-produits	Goudrons	EUR/t	217	166	262	422	292	191	349	Prix moyen à l'export, code douanier 2706
	BTX	EUR/t	467	364	483	500	406	280	515	Prix moyen à l'export, code douanier 2707
	Laitier granulé	EUR/t	13	13	19	26	48	51	39	Prix moyen à l'export, code douanier 261800
	Autres laitiers	EUR/t	6	10	20	30	22	15	16	Prix moyen à l'export, code douanier 2619

Tableau 29 : Synthèse des hypothèses de coûts en EUR courants pour la construction du coût production de la filière fonte.

La reconstitution finale du coût de production tel que modélisé pour la filière fonte entre 2015 et 2021 est présenté sur la Figure 83. Ce coût est exprimé en euros par tonne de bobine laminée à chaud, abrégée HRC en anglais pour « Hot Rolled Coil ». Le coût de production total (soit aux alentours de 500 – 600 EUR/t_{HRC}) est cohérent avec les valeurs présentées sur la Figure 81 issues de JRC (2020) [170]. Ainsi décomposé, la Figure 83 permet de rendre compte du poids des matières premières dans le coût de production, en particulier du minerai de fer du charbon. Il permet également de constater la forte hausse des

⁴⁵ Hypothèse : qualité de charbon utilisée pour l'agglomération

coûts en 2021 du fait des contraintes d'approvisionnement qui ont marquées la période post-Covid, en cohérence avec la Figure 82

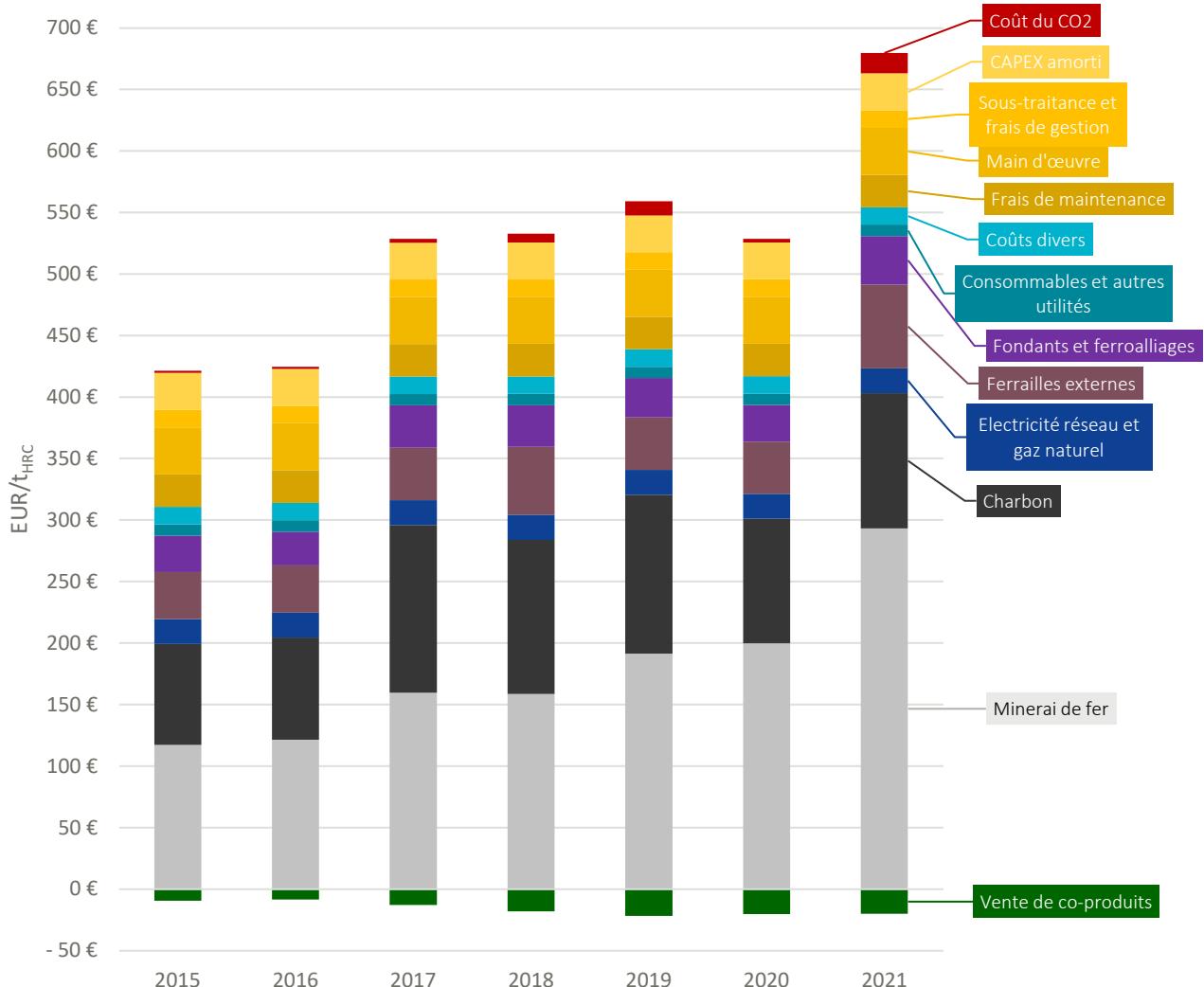


Figure 83 : Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Coût de production reconstitué entre 2015 et 2021.

Pour la filière DRI-EAF, le coût de production a été construit sur la base des consommations spécifiques en intrants énergie et matière de l'usine de référence dédiée et des prix d'achat des différentes commodités. Les coûts de main d'œuvre, de maintenance et autres coûts variables et coûts fixes ont fait l'objet d'hypothèses sur la base de V. Vogl et al. (2018) [138], K. Benavides et al. (2022) [137] et E. Jacobasch et al. (2021) [149]. En outre le coût de maintenance est estimé à 3 % du CAPEX initial soit environ 18 EUR/t_acier.an (pour un coût d'investissement de 604 EUR/t_acier.an pour un ensemble DRI-EAF). Le poste CAPEX amorti est calculé sur la base d'une durée de vie de 25 ans et d'un taux d'intérêt de 7 % soit 52 EUR/t_acier.an. Les coûts de sous-traitance et frais de gestion ainsi que les autres coûts variables ont été pris égaux à ceux de la filière fonte.

4. Trois scénarios contrastés pour illustrer les défis d'une décarbonation profonde de la sidérurgie d'ici 2050

Les univers dans lesquels les scénarios ont été projetés sont variables et les hypothèses sous-jacentes concernant la demande domestique et le commerce international diffèrent assez significativement. Ces éléments sont regroupés respectivement en sous-partie 4.1 et 4.2. Les sous-parties 4.3, 4.4 et 4.5 présentent les résultats des scénarios concernant l'évolution de la production, le niveau de réduction des émissions atteint en 2050 ainsi que le besoin en investissements associé.

4.1. Univers de transition

A l'instar de tout exercice de prospective, le travail sur la décarbonation de la filière sidérurgique à horizon 2050 comporte un degré d'incertitudes très important, en raison, notamment, des difficultés pour faire des prévisions sur l'évolution du contexte économique, social, technologique ou réglementaire à un horizon de temps aussi lointain. Ce constat aboutit à la proposition, commune aux différents Plans de Transition Sectoriels, d'inscrire la décarbonation d'une filière industrielle dans plusieurs scénarios volontairement contrastés afin de couvrir un spectre relativement large des possibilités d'évolution du secteur.

Parmi les facteurs d'incertitude structurants pour la décarbonation de la filière de l'acier (cf. encadré 1 de la section 1.5.2), celui de l'accès à une électricité bas-carbone compétitive s'apparente comme déterminant en vue du déploiement des technologies de décarbonation sur le territoire⁴⁶. Outre le mix énergétique propre à chaque pays et relativement dépendant des dotations en ressources fossiles et renouvelables sur le territoire, l'implication des pouvoirs publics dans la politique industrielle joue un rôle déterminant dans l'accès à une électricité bas-carbone compétitive, et plus généralement dans le maintien ou non de capacités de production sur le territoire. Si historiquement le choix français d'un mix énergétique dominé par l'électricité d'origine nucléaire, a permis aux industriels de bénéficier d'un prix relativement compétitif, cet avantage est à reconsidérer à moyen et long terme, à l'aune de la montée en puissance des capacités de production d'électricité renouvelable au niveau mondial et de l'éventuelle recomposition des chaînes de valeur industrielle qui en découle. Ainsi, le contraste entre les scénarios s'illustre tel que :

- Dans un contexte où les échanges internationaux ne sont ni entravés par des barrières commerciales, ni perturbés par les conséquences du réchauffement climatique sur les chaînes logistiques, les avantages comparatifs s'expriment pleinement. Le scénario « Compétitivité dégradée » met ainsi en lumière les avantages comparatifs de l'Australie, l'Afrique du Sud ou encore le Brésil pour la production d'hydrogène bas-carbone, de DRI et d'acier, à savoir des ressources renouvelables abondantes ainsi qu'un sous-sol richement doté en mineraux de fer. Afin de garantir un approvisionnement en acier pour des secteurs considérés comme stratégiques, un minimum de capacités de production d'acier en France est maintenu et le coût d'un accès à une électricité bas-carbone et compétitive est relativement restreint.
- Dans le scénario « Pari hydrogéné », les projets d'investissements sur des procédés DRI-EAF portés par la plupart des grands groupes sidérurgiques sont soutenus et continuent d'être financièrement accompagnés à travers des aides à l'investissement et un niveau de prix de l'électricité suffisamment compétitif pour garantir le maintien des capacités de production européennes. En parallèle, les industriels européens et français bénéficient de l'alourdissement des coûts de transaction des importations créé par le déploiement du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF – cf. encadré 4)⁴⁷, d'une volonté des pouvoirs publics de maintenir une filière industrielle historique à travers la promotion du *made in Europe* et du *made in France* et d'une hausse du coût du transport international pour faire face aux conséquences du changement climatique. Ces trois éléments sont à la base du phénomène tendanciel et structurel de régionalisation des flux commerciaux.
- Le scénario « Sobriété et diversification » repose sur un contexte international dans lequel les chaînes de valeur se redessinent drastiquement sous l'effet d'un coût du transport qui augmente significativement, et d'une volonté forte des pouvoirs publics en matière de relocalisation et maintien des activités industrielles au plus près des lieux de consommation. Ainsi dans un tel contexte, l'incitation pour des nouveaux entrants industriels hors UE à pénétrer le marché européen avec des produits sidérurgiques plus ou moins transformés est relativement faible. A l'instar du scénario « Pari hydrogéné » et de manière encore plus prépondérante ici, le poids du besoin en électricité bas carbone et compétitive pour les industriels, est réduit.

⁴⁶ Plus généralement, ce facteur s'apparente comme structurant pour la décarbonation et la relocalisation de certaines activités économiques, et en particulier les plus énergo-intensives.

⁴⁷ Les coûts de transaction sont ici portés par les importateurs et correspondent au coût administratif et notamment celui lié à la collecte des données et à la mise en conformité des acteurs économiques avec les autorités européennes pour l'importation de produits et matériaux dans le périmètre du MACF.

Encadré 4 : le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF)

Dans un contexte de renforcement de l'action climatique au niveau européen, le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF⁴⁸) est un instrument réglementaire dont le principal objectif est de soumettre des produits importés sur le territoire douanier européen à une tarification carbone équivalente à celle appliquée aux industriels dans le cadre du marché EU ETS. La sidérurgie, l'aluminium, le ciment, l'ammoniac, l'hydrogène et la production d'électricité sont les premiers secteurs exposés à la concurrence internationale pour lesquels le dispositif est entré en vigueur en octobre 2023, dans une phase de test. En se substituant progressivement au dispositif existant d'allocation de quotas gratuits (disparition totale des quotas gratuits prévue en 2034), le MACF entend lutter contre le risque de fuite de carbone tout en favorisant l'internalisation du prix du CO₂ dans les chaînes de valeur internationales. Cette nouvelle configuration devrait permettre, notamment, de stimuler le déploiement de technologies de décarbonation et favoriser l'incorporation de matières primaires secondaires dans les produits et biens de consommation. Par ailleurs, la mise aux enchères de plus de quotas permettrait à l'UE et aux gouvernements nationaux d'obtenir des fonds substantiels et indispensables à consacrer aux politiques climatiques, notamment aux technologies industrielles de pointe qui nécessiteront probablement d'importants soutiens financiers (le MACF devrait générer entre 10 et 14 milliards d'€ de recettes par an à partir de 2030 au bénéfice du budget européen). Néanmoins, des modalités de mise en application du MACF comme l'intégration des émissions indirectes ou encore l'élargissement à davantage de secteurs, doivent encore être précisées dans les années à venir pour maximiser l'efficacité du dispositif.⁴⁹

L'évolution de la demande domestique d'acier des secteurs consommateurs constitue un deuxième facteur d'incertitude structurant. Compte tenu de la multitude de débouchés de l'acier, les besoins à horizon 2050 devraient se maintenir à un niveau relativement élevé. Néanmoins, le poids des différents secteurs dans les filières de production d'acier diffère et pourrait amener des perspectives de production variables selon que la production est issue des hauts fourneaux ou bien des fours à arc électrique historiques. Les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME mettent notamment en lumière la place de la sobriété et des changements de comportement de consommation dans différents scénarios, ou encore les potentielles conséquences d'évolutions réglementaires de secteurs comme le BTP ou les emballages. Les univers de transition initiés avec le précédent facteur d'incertitude peuvent être associés au cadrage des différents scénarios de Transition(s) 2050, et notamment la place des politiques de sobriété et de modifications dans les comportements de consommation. Ainsi, le scénario *Compétitivité dégradée* s'apparente au scénario S4 « Pari réparateur », le scénario *Pari hydrogéné* au S3 « Technologies vertes » et le scénario *Sobriété et diversification* au S2 « Coopérations territoriales »⁵⁰.

D'une manière générale, le contraste des scénarios peut donc s'observer sur le Tableau 30:

	A horizon 2050	Compétitivité dégradée	Pari hydrogéné	Sobriété et diversification
Politique industrielle	Réindustrialisation des activités « avals »	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Effet du MACF sur la réduction des flux imports/exports	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Développement de la filière H2	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Technologie	Déploiement du DRI en substitution des hauts fourneaux	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Déploiement de l'électrolyse directe du fer	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Déploiement du CCS	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Demande domestique	Réduction du rythme de constructions neuves (résidentiel)	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Besoin de mobilité	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Report modal vers la mobilité « douce »	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	Déploiement des énergies renouvelables	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Economie circulaire	Mobilisation du gisement de ferrailles sur le territoire	★★★★★	★★★★★	★★★★★

Tableau 30: Illustration du contraste des scénarios

⁴⁸ Connu également sous son appellation anglaise « CBAM », pour *Carbon Border Adjustment Mechanism*

⁴⁹ Plus d'informations disponibles dans la note : « [Analyse des différentes modalités d'application du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières de l'Union Européenne](#) », Oliver Sartor et Sylvain Sourisseau, 2022.

⁵⁰ Pour plus d'informations, consulter le site internet dédié : <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>

En dépit de leur contraste, ces trois scénarios partagent des similarités illustrant les tendances d'évolution de la sidérurgie :

- **Décarbonation incrémentale des hauts fourneaux** jusqu'à la mise en place des installations de la voie DRI-EAF : hausse de la part de ferrailles dans les convertisseurs à oxygène (de 17 % à 28 % en moyenne en 2026) et recirculation des gaz de cokerie à partir de 2024 ;
- **Développement de la voie DRI-EAF** : construction de fours à réduction directe (DRP) ainsi que de fours à arc électrique en 2027 puis 2035 pour remplacer les hauts fourneaux fermés ;
- **Fermeture progressive des hauts fourneaux** : essentiellement d'ici 2027⁵¹ puis en 2035 (excepté dans Sobriété et diversification où un haut fourneau est maintenu sur les six) ;
- **Captage et stockage géologique des émissions de CO₂** sur le laminage à chaud à partir de 2036 ;
- Amélioration de l'**efficacité énergétique** des fours à arc électrique existants.

4.2. Principales hypothèses de marché

4.2.1. Demande domestique

Les principales hypothèses sont listées dans le Tableau 31. Elles proviennent de deux sources principales : le Plan de Transition Sectoriel du ciment (1) et Transition(s) 2050 (2). D'autres hypothèses sont arbitrairement prises en compte dans la modélisation et ont pour unique objectif de refléter un contexte de transition à horizon 2050 (3). Par ailleurs, les valeurs sont données pour l'année 2050 et masquent donc des dynamiques d'évolution relativement différentes entre les scénarios. A titre d'exemple, l'effort sur la rénovation dans le secteur du bâtiment est surtout accentué entre 2025 et 2035 pour le scénario *Sobriété et diversification*, avant de marquer le pas à horizon 2050. Une telle dynamique est également retenue pour le scénario *Compétitivité dégradée* mais dans des proportions moindres. En revanche, le déploiement des énergies renouvelables essentiellement réalisé sur la décennie 2022-2030, concerne les 3 scénarios (*i.e.* avec les mêmes objectifs issus de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie⁵²). Les différences s'observent en 2050 en fonction de la place des énergies renouvelables dans le mix énergétique pris en compte dans les scénarios de Transition(s) 2050.

⁵¹ Soit un calendrier accéléré par rapport à la feuille de route de la filière « Mines et Métallurgie », où ArcelorMittal prévoit un remplacement progressif de trois de ses cinq hauts fourneaux entre 2027 et 2030 par trois fours à arc électrique et une unité de réduction directe (DRP) d'une capacité de 2,5 Mt.

⁵² Plus d'informations disponibles : <https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

Paramètre (unité/an)	Valeur en 2015	Valeur en 2050 (variation par rapport à 2015)			Sources
		Sobriété et diversification	Pari hydrogéné	Compétitivité dégradée	
BATIMENT et TRAVAUX PUBLICS					
Maisons individuelles - MI et logements collectifs - LC (nbre de constructions neuves)	338 719	66 400 (-80 %)	220 587 (-35 %)	179 661 (-47 %)	(1) (2)
Tertiaire, industriel et agricole (milliers de m ² construits)	21 750	11 825 (-46 %)	19 180 (-13 %)	19 278 (-11 %)	(1) (2)
Rénovation non-BBC – « gestes » (MI, LC et tertiaire)	3 556 550	1 618 103 (-54 %)	3 556 550 (constant)	2 127 930 (-40 %)	(1) (2)
Rénovation BBC	16 100	473 350 (x 28)	82 083 (x 5)	188 100 (x 12)	(1) (2)
Part de marché du bois dans les constructions MI (%)	10 %	40 %	15 %	14 %	(1) (2)
Autoroutes (km)	89	0	0	0	(1) (2)
Communales (km)	7 000	500	7 000 (constant)	7 000 (constant)	(1) (2)
LGV (km)	45	0	66 (+50 %)	66 (+50 %)	(1) (2)
Tramway (km)	45	0	66 (+50 %)	66 (+50 %)	(1) (2)
TRANSPORTS					
Total distance parcourue à vélo (Gkm voyageurs)	6	18 (x 3)	34 (x 4,7)	16 (x 3)	(2)
Total distance parcourue en train (Gkm voyageurs)	105	126 (+20 %)	161 (+56 %)	162 (+56 %)	(2)
Total distance parcourue en voiture (Gkm voyageurs)	724	745 (+3 %)	767 (+8 %)	970 (+34 %)	(2)
Véhicules neufs (nombre de ventes en milliers)	1 777	1 357 (-24 %)	2 277 (+28 %)	3 550 (x 2)	(2)
Part de véhicules électrique vendues (%)	0 %		99 %		(2)
ENERGIE					
Capacité installée éolien off-shore (MW/an)	0	1 155	2 311	2 311	(2) (3)
Capacité installée éolien terrestre (MW/an)	1 156	2 141 (+85 %)	1 962 (+70 %)	2 319 (x 2)	(2) (3)
Capacité installée photovoltaïque au sol (MW/an)	577	2 294 (x 4)	3 059 (x 5)	3 250 (x 6)	(2) (3)
Capacité installée photovoltaïque toiture (MW/an)	381	1 180 (x 3)	2 832 (x 6)	2 832 (x 6)	(2) (3)
BIENS D'EQUIPEMENTS ET DE CONSOMMATION					
Mécanique/Moteurs générateurs (évolution de la consommation en % par habitant)	0 %		-5 %		(2)
Électronique grand public (évolution du taux d'équipement par personne)	0 %		+221 %		(2)
Eclairage électroménager (évolution du taux d'équipement par personne)	0 %		+34 %		(2)
EMBALLAGES					
Evolution de la consommation d'emballages en acier (%)	0 %	+7 %	+17 %	+28 %	(2)
Taux de réutilisation des emballages en acier (%)	37 %	60 %	50 %	40 %	(2)

Tableau 31: Principales hypothèses retenues pour la modélisation de la demande en acier en France à horizon 2050

4.2.2. Commerce international

Comme esquissé en sous partie 4.1 relative au facteur d'incertitude « accès à l'électricité bas-carbone compétitive », les évolutions en matière de commerce international diffèrent fortement d'un scénario à l'autre.

Les hypothèses ne proviennent pas de sources bibliographiques existantes et ne constituent pas de prévisions. En effet, à horizon 2030 et 2050, les facteurs d'incertitudes sur l'évolution des flux d'importations et d'exportations sont nombreux et une prévision de cette évolution nécessiterait un travail de modélisation spécifique. A défaut d'un tel travail, les taux d'importation et d'exportation sont fixés arbitrairement sur la base de l'évolution des flux sur la période 2014-2019 pour chacune des trois filières. Les taux ont surtout pour vocation de refléter la configuration du commerce international tel qu'esquissée dans chacun des trois univers de transition.

		Importations				Exportations			
		Taux d'importation		Evolution par rapport à 2022 (e)		Taux d'exportation		Evolution par rapport à 2022 (e)	
		2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Pari hydrogéné	Aciers plats	65 %	65 %	-4 %	-7 %	68 %	70 %	+12 %	+22%
	Aciers longs carbone	54 %	52 %	-5 %	-14 %	48 %	47 %	+1 %	0 %
	Aciers inox et fortement alliés	77 %	75 %	+5 %	+12 %	65 %	66 %	+13 %	+31 %
Compétitivité dégradée	Aciers plats	65 %	78 %	+1 %	+20 %	68 %	58 %	+14 %	-54 %
	Aciers longs carbone	62 %	64 %	+12 %	+2 %	44 %	40 %	-26 %	-47 %
	Aciers inox et fortement alliés	69 %	61 %	+4 %	+9 %	61 %	57 %	+4 %	-14 %
Sobriété et diversification	Aciers plats	60 %	50 %	-17 %	-40 %	60 %	50 %	-13 %	-42 %
	Aciers longs carbone	45 %	35 %	-28 %	-58 %	62 %	64 %	-18 %	-43 %
	Aciers inox et fortement alliés	69 %	61 %	-12 %	-19 %	61 %	57 %	+16 %	+26 %

Tableau 32: Hypothèses sur le commerce international à horizon 2030 et 2050 selon les scénarios et les types d'acières

Concernant le scénario *Sobriété et diversification*, il est supposé une relocalisation des flux commerciaux à l'échelle régionale. Cette configuration résulte de trois facteurs :

- L'application du MACF aux frontières des pays membres de l'Espace Economique Européen (EEE)⁵³ n'a pas entraîné une décarbonation importante des industries des pays tiers, entraînant un surcoût suffisamment significatif pour que les importateurs et les industriels exportateurs reconcentrent l'essentiel des échanges autour de grands pôles régionaux ;
- La hausse du coût du transport liée à l'augmentation du prix des énergies et de l'assurance pour faire face aux aléas climatiques et donc aux potentielles tensions sur la logistique ;
- Une volonté des pays à limiter l'étendue des chaînes de valeur afin de réduire la dépendance aux évolutions du contexte géopolitique et contenir les risques d'approvisionnement en matériaux stratégiques, dont certains alliages.

Concernant le scénario *Compétitivité dégradée*, l'univers de transition dans lequel les industriels français de l'acier sont supposés évoluer, implique un développement des flux commerciaux à l'échelle mondiale et révèle la faible compétitivité des industriels français dans cette concurrence internationale. Cette configuration résulte de trois facteurs :

- La souplesse des modalités d'application du MACF accompagnée d'un travail diplomatique important à l'égard des pays initialement réticents à un tel dispositif, ont permis, à travers une harmonisation des tarifications carbone, la

⁵³ Il a été fait l'hypothèse que les pays membres de l'EEE ainsi que la Suisse et la Grande Bretagne s'intègrent dans le périmètre géographique du MACF en raison de la fusion de leurs marchés carbone respectifs.

décarbonation significative des mix énergétiques et des procédés industriels internationaux, diminuant de facto le risque de fuite de carbone ;

- La décarbonation du secteur des transports a facilité le développement des échanges commerciaux dont la physionomie relève donc uniquement des avantages comparatifs des pays, hors « dumping carbone »⁵⁴;

Concernant le scénario *Pari hydrogéné*, les hypothèses prises illustrent les tendances esquissées dans les deux autres univers de transition, mais de manière plus mesurée. Ainsi, ce scénario reflète une évolution des échanges commerciaux qui tend à se régionaliser à travers le monde. La mise en place du MACF aura eu l'effet escompté : les pays tiers sont incités à mettre en place des mécanismes de tarification du carbone et la production mondiale d'acier se décarbone progressivement. L'Europe profite toutefois de son avance en matière de maîtrise technologique (notamment le DRI-H₂) par rapport aux pays tiers pour rester compétitive face aux importations.

Par ailleurs, des dynamiques hétérogènes sur le commerce international des produits en aval de la filière ont également été prises en compte. Plus précisément, le scénario *Pari hydrogéné* intègre une réindustrialisation mesurée de certaines activités stratégiques comme la production d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques. Cette dynamique est beaucoup plus étendue et ambitieuse pour le scénario *Sobriété et diversification* et absente dans le scénario *Compétitivité dégradée*.

4.3. Scénario « Pari Hydrogéné » : une production en hausse assurée par l'usage d'hydrogène électrolytique à un prix compétitif

4.3.1. Une production en hausse du fait d'un effort de relocalisation et d'une demande stable

Dans ce scénario, la consommation française d'acier augmente de 2 % entre 2022 et 2050. Cela est notamment le fait de la croissance de la consommation électrique, qui quadruple la demande en acier à destination du secteur énergétique (éolien et photovoltaïque notamment). Cette augmentation est toutefois tempérée par une baisse de la demande à destination du bâtiment, où les besoins pour la rénovation thermique (x4) sont largement compensés par une baisse de 35 % de la construction neuve. Les échanges commerciaux d'acier restent concentrés en UE (dans la poursuite des tendances actuelles), dans un contexte de collaboration technologique et de transition collective vers la voie DRP-H₂ / EAF. En 2050, les importations sont réduites de 6 % et les exportations augmentent de 18 % par rapport à 2015, réduisant le déficit du solde commercial en acier (différence entre tonnes d'acier importées et exportées) qui s'était établi entre 2014 et 2019. En outre, un effort de relocalisation de la production d'éoliennes (30 % en France) et de panneaux photovoltaïques (10 % en France) permet d'adresser une grande part de la hausse de la demande du secteur énergétique aux sidérurgistes français. Cela correspond, en Figure 84, à la hausse des imports indirects d'acier (i.e. des importations de produits transformés contenant de l'acier), stimulés par la forte demande en équipements énergétiques, mais dans une envergure limitée par l'effort de relocalisation consenti. **En conséquence, la production française d'acier progresse de 11 % entre 2022 et 2050.**

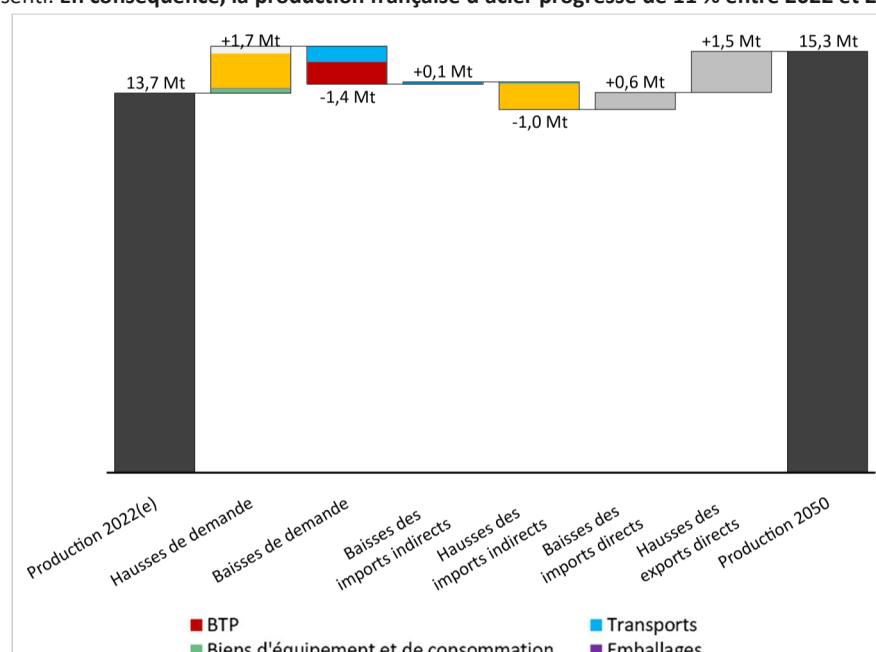


Figure 84: Scénario Pari Hydrogéné - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050

⁵⁴ L'harmonisation de la tarification carbone réduit à néant les délocalisations qui pourraient s'opérer pour une raison climatique, mais n'empêche pas les autres formes de dumping liés à d'autres externalités environnementales ou au coût du travail.

Cette évolution agrégée de la consommation masque cependant quelques différences entre les produits sidérurgiques. Alors que la consommation de produits plats issus de la filière primaire (hauts fourneaux et DRI-EAF) se contracte de 4 % en 2050, elle augmente de 12 % pour les produits issus de la filière électrique historique, principalement en raison des besoins importants dans le secteur énergétique. Les produits inox et fortement alliés sont les principaux bénéficiaires de ces futurs besoins sur le marché domestique mais aussi à l'export dont le volume augmente de 31 %, contre 22 % pour les produits plats. En retenant une tendance à la baisse des importations comme résultat d'une ambition de relocalisation bénéfique à l'industrie française, les niveaux de production augmentent respectivement de 14 % et 31 % pour les produits plats et les inox et fortement alliés. En revanche, la dynamique exportatrice moins favorable pour les produits longs carbone, ne permet pas à cette filière traditionnelle d'augmenter son niveau de production, dont les débouchés se sont par ailleurs diversifiés pour compenser le recul de l'activité du BTP. En 2050, le niveau de production est donc stabilisé par rapport à celui estimé en 2022.

4.3.2. Une transition technologique ambitieuse vers la réduction directe par hydrogène pour remplacer les hauts fourneaux

L'ensemble des hauts fourneaux français est fermé dans ce scénario à horizon 2035. Des fours à arcs électriques sont construits à iso-capacité pour les remplacer (11 Mt), car le niveau de production reste stable à long terme. Ces fours transforment en acier des ferrailles ainsi que du minerai de fer pré-réduit (DRI), qu'il soit produit ou non sur site. Au total, du fait de la compétitivité de l'approvisionnement en hydrogène en France, trois fours de réduction directe sont ouverts en 2026, 2027 et 2035 pour produire 6,8 Mt de DRI ou HBI en 2050. Le premier fonctionne initialement au gaz naturel qui est progressivement remplacé par de l'hydrogène à horizon 2035. Les deux autres sont directement opérés à l'hydrogène. Ces DRP ont la capacité théorique de couvrir presque tous les besoins nationaux en DRI et HBI, de sorte à conserver un solde commercial de HBI proche de l'équilibre, dans une optique de souveraineté nationale.

En complément, les conditions d'accès favorables à l'électricité bas-carbone permettent à la filière EAF existante de s'électrifier davantage. Elle développe la recarbonatation des laitiers à partir de 2031 et substitute également au charbon des déchets plastiques jusqu'à 50 % en 2043.

Le scénario atteint dès 2039 une réduction de 95% des émissions directes annuelles de la sidérurgie française par rapport à 2015 (Figure 85). En cumulé, 144 MtCO₂ sont émises entre 2023 et 2050, soit 71 % de moins que si les émissions étaient restées constantes au niveau de 2022. Sur ces baisses d'émissions cumulées d'un total de 386 MtCO₂, les trois quarts (292 MtCO₂) sont attribuables au remplacement des hauts fourneaux par des fours à arc électrique. Cette transition s'accompagne néanmoins de l'émission de 11 MtCO₂ cumulées du fait de la production de DRI à partir de gaz naturel jusqu'en 2035. Comparativement, les autres évolutions technologiques pèsent peu dans cette réduction d'émissions. L'augmentation du taux de ferrailles et l'injection de gaz de cokerie permettent néanmoins de réduire d'environ 17 MtCO₂ les émissions cumulées d'ici à la fermeture complète des hauts fourneaux en 2035.

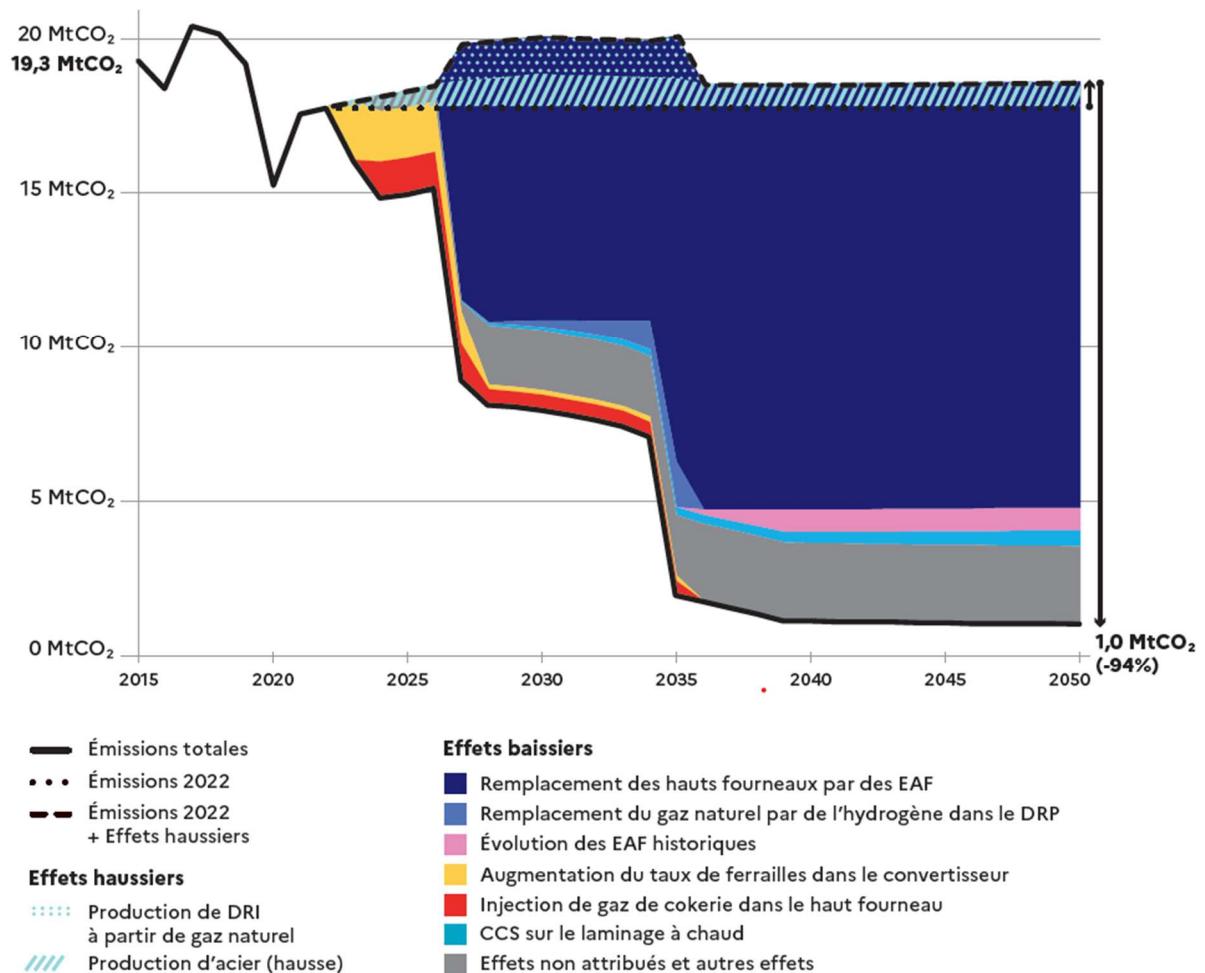


Figure 85. Scénario Pari hydrogéné - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO₂ entre 2022 et 2050

Les investissements engagés se chiffrent à hauteur de 13 milliards d'euros, essentiellement pour la voie DRI-EAF. La construction des DRP et des fours à arc électrique concentré, en 2027 et en 2035, les trois quarts des 6,3 milliards d'euros investis d'ici à 2050 (Figure 86). A ce total s'ajoutent 6,6 milliards d'euros d'investissements externes pour la construction et le renouvellement des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène afin d'alimenter les DRP. La décarbonation des fours à arc électriques existants, entre 2026 et 2050, représente quant à elle 1,3 milliard d'euros, soit un cinquième des investissements totaux hors électrolyse, principalement du fait du développement de fours à induction.

⁵⁵ Parmi ces effets baissiers, les effets non attribués sont hérités des effets de la hausse du taux de ferrailles dans les convertisseurs ainsi que de l'injection de gaz de cokerie, rendus caducs au moment de la fermeture des hauts fourneaux.

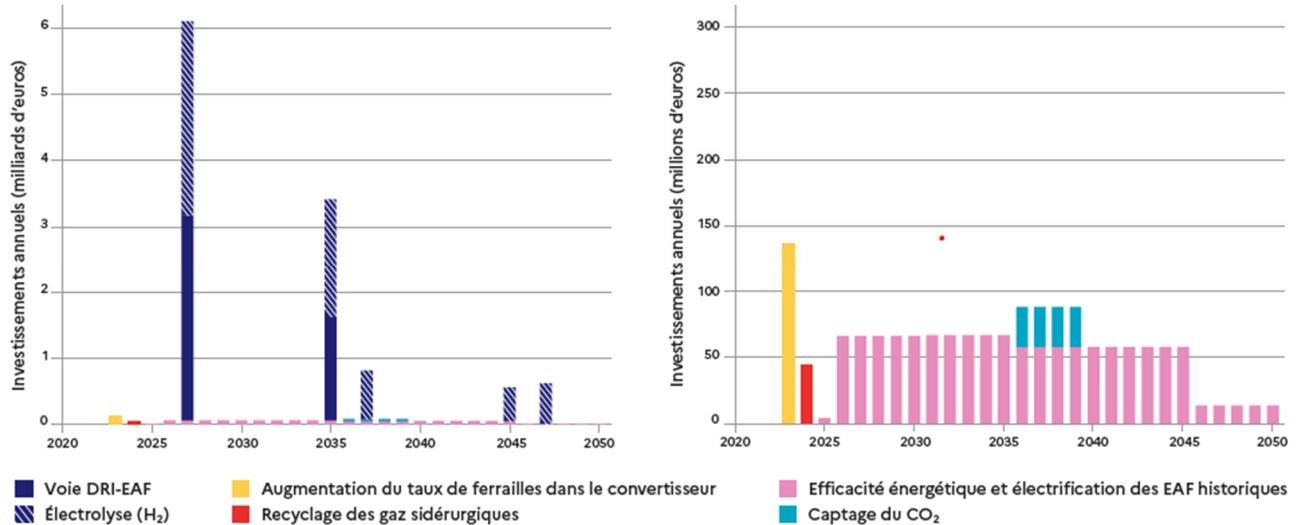


Figure 86. Scénario Pari hydrogéné – Chroniques d'investissements annuels, tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite)

Conditions de réussite :

Le succès du scénario *Pari Hydrogéné* repose sur plusieurs hypothèses et conditions.

- Il nécessite l'accessibilité à de l'**hydrogène bas-carbone à un coût compétitif**, ce qui implique une sécurisation de l'approvisionnement en électricité bas-carbone et une adaptation du système électrique pour répondre à une demande multipliée par cinq (cf. section 3.3).
- Il requiert de sécuriser le **gisement de ferrailles** à long terme pour soutenir une demande en forte hausse.
- Il suppose une disponibilité suffisante des **ressources en eau** pour l'électrolyse de l'eau, qui pourrait être contrainte dans un contexte de réchauffement climatique.
- Enfin, la voie DRI-EAF requiert un approvisionnement en **mineraux de fer de haute qualité**⁵⁶.

Pour aller plus loin :

- La voie DRP-H₂ / EAF est particulièrement consommatrice d'électricité mais peut offrir des gisements d'effacement sans arrêt de production. En effet, certains DRP peuvent fonctionner avec un mix flexible d'hydrogène ou de (bio)méthane, permettant de consommer du (bio)méthane lors des heures de pointe électrique.
- L'utilisation d'un stockage d'hydrogène en cavités salines permettrait également d'offrir une flexibilité électrique sur de nombreuses heures. Ce pourrait être le cas à Fos-sur-Mer du fait de la proximité du potentiel site de stockage de Manosque, mais l'utilisation de ce site pourra entrer en compétition avec d'autres usages, tels que la production d'e-fuels.
- Enfin, la consommation d'hydrogène dont la production n'impliquerait pas une mobilisation du système électrique local permettrait de réduire la charge sur le réseau. Parmi les solutions mobilisables figurent l'importation d'hydrogène par hydrogénoducs, la production d'hydrogène bas carbone par d'autres procédés que l'électrolyse (ex. : pyrolyse de méthane par plasma) ou la valorisation de gisements d'hydrogène géologique.

4.4. Scénario « Compétitivité dégradée » : face au manque de compétitivité des prix de l'énergie en France, la décarbonation de l'acier repose sur la délocalisation de la production et le captage de CO₂, plutôt qu'un recours trop coûteux à l'hydrogène

4.4.1. Un net recul de la production du fait de délocalisations et malgré une consommation intensifiée

Dans ce scénario, la consommation française d'acier augmente de 6 % entre 2022 et 2050. Il prévoit une intensification des modes de consommation actuels et donc une demande accrue en acier à destination notamment des transports et des emballages (+13 %), malgré un recul du BTP (-17 %). Cette hausse de la consommation est par ailleurs plus importante pour les produits issus de la filière électrique historique (+11 %) que pour les produits plats issus de la filière primaire (+3 %).

⁵⁶ L'utilisation de fours « SAF » (Submerged Arc Furnace) permettrait d'outrepasser cette limite, mais elle est moins mature et n'a pas été modélisée.

La compétitivité de la sidérurgie européenne s'érode face à des concurrents hors-UE qui adoptent la voie DRP-H₂ / EAF en bénéficiant d'électricité renouvelable à bas prix et de gisements de fer. En 2050, les importations d'acier augmentent de 12 % et les exportations reculent de 49 % par rapport à 2022, accentuant la dégradation du solde commercial de l'acier (différence entre tonnes d'acier importées et exportées) observée en France entre 2014 et 2019. En outre, la hausse de la demande en équipements énergétiques ne profite pas aux sidérurgistes français car ils restent pour l'essentiel importés. Cela correspond, en Figure 87, à la hausse des imports indirects d'acier (*i.e.* des importations de produits transformés contenant de l'acier), stimulés par la forte demande en équipements énergétiques. La production française d'acier est fortement affectée par ces difficultés de compétitivité, si bien que des capacités sont fermées.

Au-delà de ce constat général, il convient de souligner que sur la base de l'évolution constatée entre 2014 et 2019, la dégradation de la compétitivité est moins forte pour les produits inox et fortement alliés que pour les produits longs carbone et les produits plats, en raison d'un positionnement sur des marchés plus spécifiques pour lesquels le poids du critère prix est relativement moins important. A titre d'exemple, les volumes exportés sont supposés être réduits d'environ 50 % pour les longs carbone et les produits plats, contre 14 % pour les inox et fortement alliés. ***In fine, les productions respectives d'acier primaire, d'acier long et d'acières inox et fortement alliés reculent ainsi de 48 %, 34 % et 5 %.***

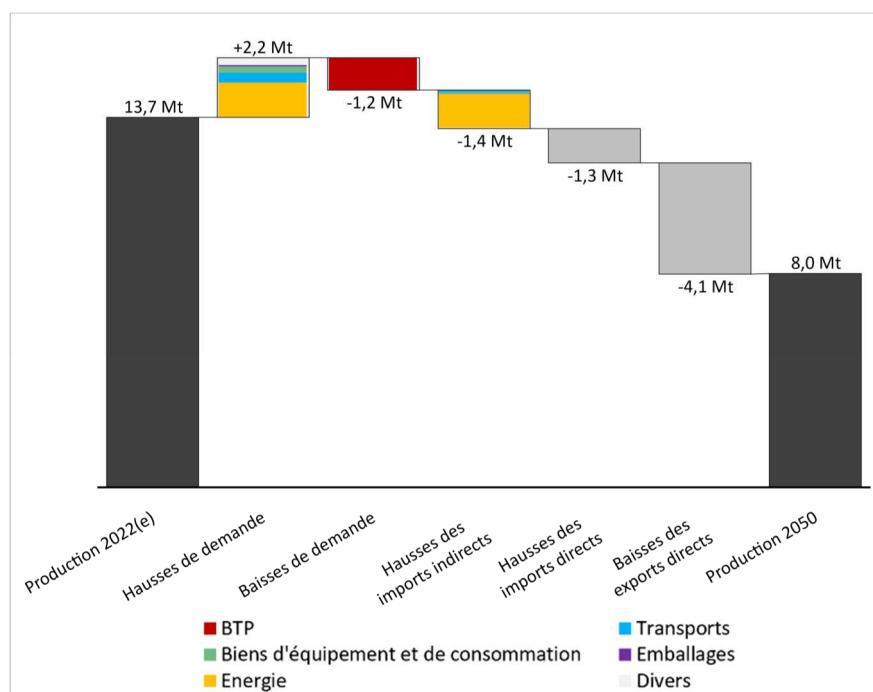


Figure 87. Scénario Compétitivité dégradée - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050

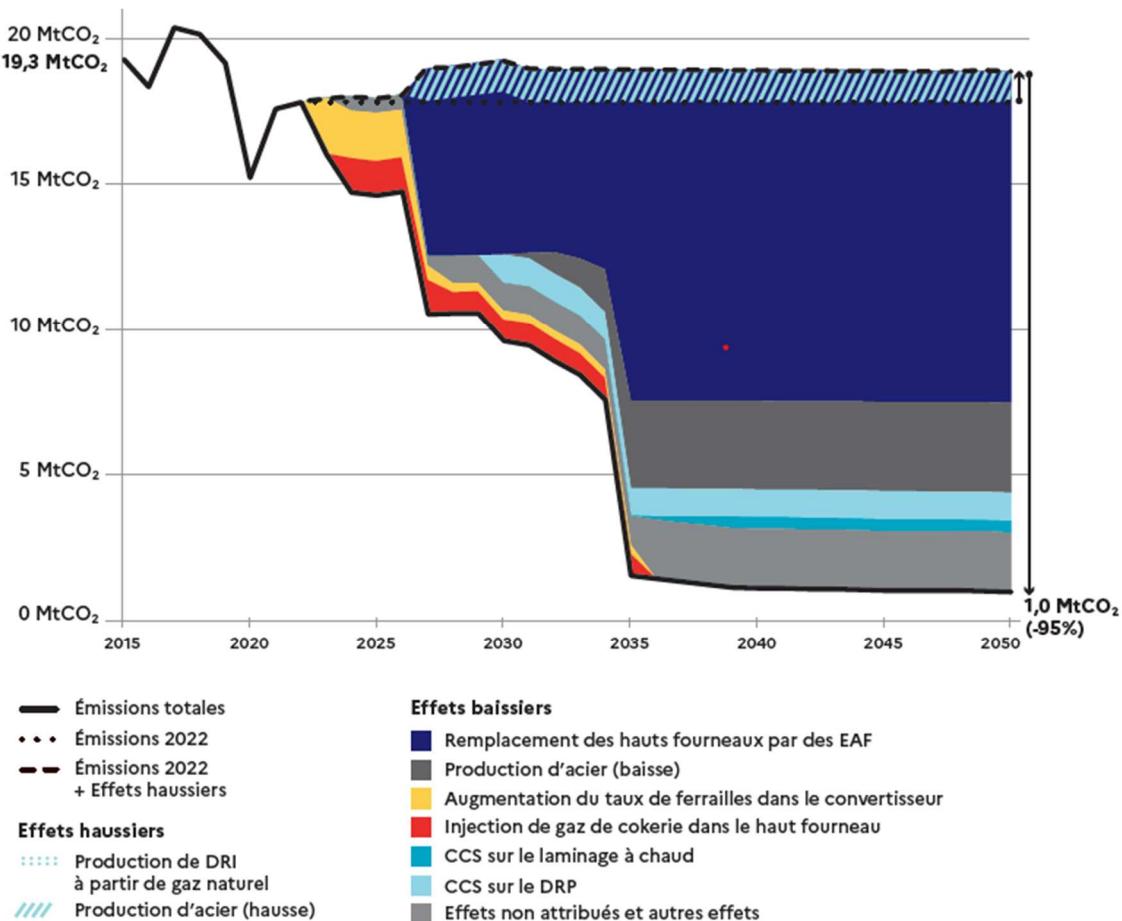
4.4.2. Une transition technologique des hauts fourneaux vers les fours à arc électrique, intégrant une production de nationale de DRI limitée et basée sur l'utilisation de gaz naturel et la séquestration de CO₂

Dans ce scénario, la voie DRP-H₂ / EAF est compromise du fait du manque de compétitivité de l'hydrogène bas-carbone en France. **Les hauts fourneaux sont ainsi remplacés par des fours à arc électrique** : ils permettent de valoriser les gisements de ferrailles et intègrent également du HBI importé, afin de respecter des exigences relativement contraignantes de la part des clients de la filière primaire quant à la teneur de l'acier en fer vierge (30 % de ferrailles incorporées).

Du DRI est tout de même produit en France dans un souci de maîtrise de la chaîne de valeur, notamment au vu des usages stratégiques de l'acier (ex. : système énergétique, défense). Toutefois, les conditions économiques ne permettent pas son fonctionnement à partir d'hydrogène : il reste donc alimenté avec du gaz naturel. Pour garantir sa décarbonation, une unité de captage de CO₂ est installée dès 2030 et le CO₂ est transporté pour stockage géologique en mer du Nord. Concernant les fours à arc électriques existants, ils se décarbonent peu, hormis les gains d'efficacité énergétique communs à tous les scénarios. En 2035 néanmoins, 30 % des consommations de charbon auront été remplacées par des déchets plastiques.

L'évolution des émissions de la sidérurgie française est semblable à celle du scénario *Pari hydrogéné*. **Les émissions directes annuelles se réduisent de moitié en 2030 et de 95% en 2050 par rapport à 2015** (voir Figure 88). En cumulé, 155 MtCO₂ sont émises entre 2023 et 2050, soit 69% de moins que si les émissions étaient restées constantes au niveau de 2022. Sur ces baisses d'émissions cumulées (372 MtCO₂ au total), les deux tiers (235 MtCO₂) sont attribuables au remplacement des hauts fourneaux par des fours à arc électrique, du fait du développement de la voie DRI-EAF. Le choix de la réduction par gaz naturel entraîne la production d'environ 1 MtCO₂/an, qui est, pour l'essentiel, captée et stockée. Néanmoins, contrairement au

scénario *Pari hydrogéné*, une part significative (14%) des baisses des émissions est liée à la délocalisation de la production, qui évite environ 3 MtCO₂/an sur le territoire français.



Cle de lecture : En 2040, l'ensemble des évolutions ayant eu lieu depuis 2022 aura entraîné une hausse cumulée de 1,1 MtCO₂/an des émissions annuelles par rapport à celles de 2022 (due à la production de DRI à partir de gaz naturel⁵⁷) et une baisse cumulée de -18 MtCO₂/an (comprenant notamment le captage de CO₂ au niveau du DRP)⁵⁸.

Figure 88. Scénario Compétitivité dégradée - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO₂ par effets cumulés entre 2022 et 2050

2,6 milliards d'euros d'investissements sont mobilisés d'ici 2050 dans ce scénario, soit relativement peu comparé aux autres scénarios, du fait d'une baisse de la capacité de production et d'un plus faible développement technologique. La construction, en 2027, du DRP et de l'EAF (1,9 milliard d'euros) concentre les trois quarts du montant (voir Figure 89). Le développement du captage du CO₂, notamment au niveau du DRP, représente, quant à lui, 265 millions d'euros d'investissement (10% du total).

⁵⁷ Cette hausse des émissions est en grande partie théorique car, sur cette production de 1,1 MtCO₂/an, 0,96 MtCO₂/an est en pratique captée.

⁵⁸ Parmi ces effets baissiers, les effets non attribués sont hérités des effets de la hausse du taux de ferrailles dans les convertisseurs ainsi que de l'injection de gaz de cokerie, rendus caducs au moment de la fermeture des hauts fourneaux.

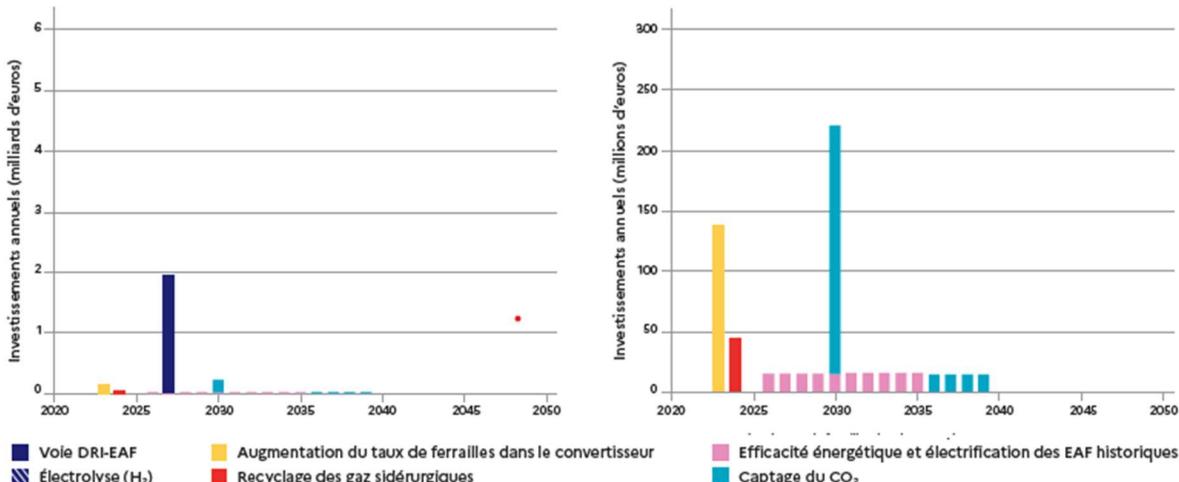


Figure 89. Scénario Compétitivité dégradée - Chroniques d'investissements annuels tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite)

Conditions de réussite :

Le succès du scénario *Compétitivité dégradée* repose sur plusieurs hypothèses et conditions.

- Il nécessite de garantir le **libre-échange** sur la base de relations de **confiance** entre pays importateurs et exportateurs. En effet, ce scénario suit une logique de spécialisation régionale, où les pays disposant d'énergie bas-carbone et bon marché deviennent les producteurs et exportateurs privilégiés, tandis que les autres pays, dont la France, deviennent importateurs, en concédant une part de souveraineté.
- Pour ces mêmes raisons, il suppose que les pays producteurs d'acier réussissent leur transition écologique (production d'électricité bas carbone, infrastructures, ...), **au risque d'importer un acier à l'empreinte carbone plus élevée** qu'une production nationale.
- Il repose également en grande partie sur le captage et le stockage de CO₂, alors que des technologies alternatives pourraient permettre de ne pas produire de CO₂.

Pour aller plus loin :

Afin de viser des émissions nettes négatives, le DRP, dont les émissions sont captées et stockées, pourrait intégrer une fraction de biométhane. En cas de fuites de CO₂ le long des infrastructures de captage, transport et stockage, cela permettrait en outre, sinon d'annuler, de retarder la réémission du carbone biogénique capté bien au-delà du temps de restauration de la biomasse prélevée. Toutefois, cette intégration devra respecter la hiérarchisation des usages de la biomasse, dont la disponibilité est limitée.

4.5. Scénario « Sobriété et diversification » : de multiples voies technologiques accompagnées d'un effort de sobriété

4.5.1. Une baisse de la production en lien avec la sobriété immobilière, malgré un net effort de relocalisation de certaines activités

Dans ce scénario, la **consommation française d'acier diminue de 20 % entre 2022 et 2050, du fait d'une montée en puissance de la sobriété, notamment foncière** (en lien avec l'objectif *Zéro Artificialisation Nette*). La demande en acier du BTP et des transports se réduit ainsi de moitié du fait d'une division par cinq des constructions neuves et de l'évolution des mobilités. Toutefois, ce ralentissement est partiellement compensé par une demande accrue en acier pour le déploiement des énergies renouvelables (x3) (Figure 90).

Les imports et exports d'acier entre la France et l'international se contractent d'environ un tiers et le solde commercial en acier se rééquilibre en 2050, du fait d'une volonté de relocalisation et de la hausse du coût du transport. Les échanges qui subsistent s'établissent à l'échelle européenne. En outre, un important effort de relocalisation de la production d'éoliennes (75% en France) et de panneaux photovoltaïques (40% en France) permet d'adresser une grande part de la hausse de la demande du secteur énergétique aux sidérurgistes français, notamment de la filière inox et fortement alliés. Cela correspond, en Figure 90, à la hausse des imports indirects d'acier (i.e. des importations de produits transformés contenant de l'acier), stimulés par la forte demande en équipements énergétiques, mais dans une envergure grandement limitée par l'effort de relocalisation consenti.

Ainsi, les efforts de sobriété entraînent un **recul de 20% de la production française des aciers primaire et des aciers longs**, mais l'industrialisation, en France, de la fabrication d'équipements de production d'énergies renouvelables fait **augmenter la production de produits inox et fortement alliés de 43%**.

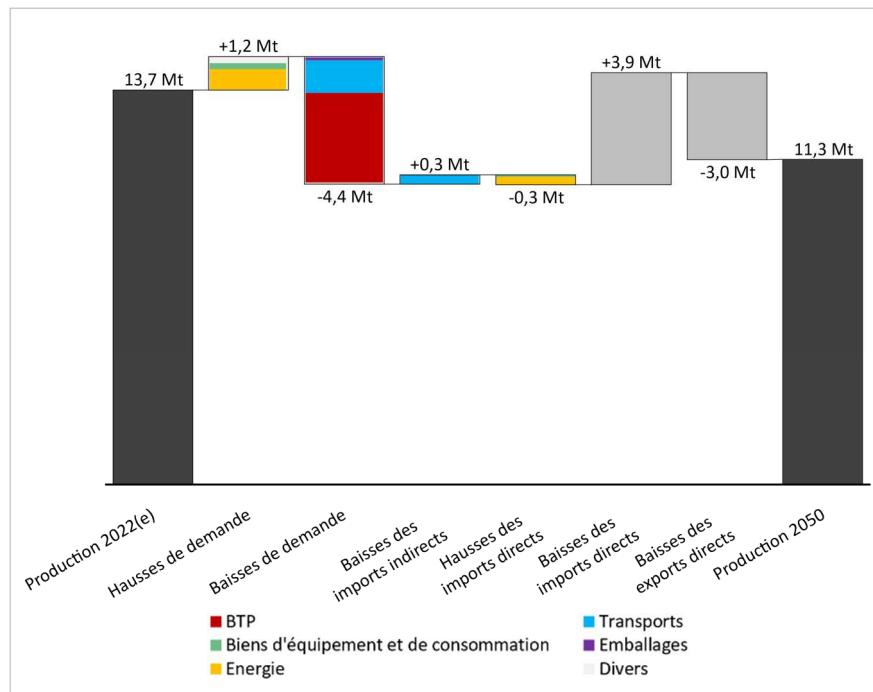


Figure 90. Scénario Sobriété et diversification - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050

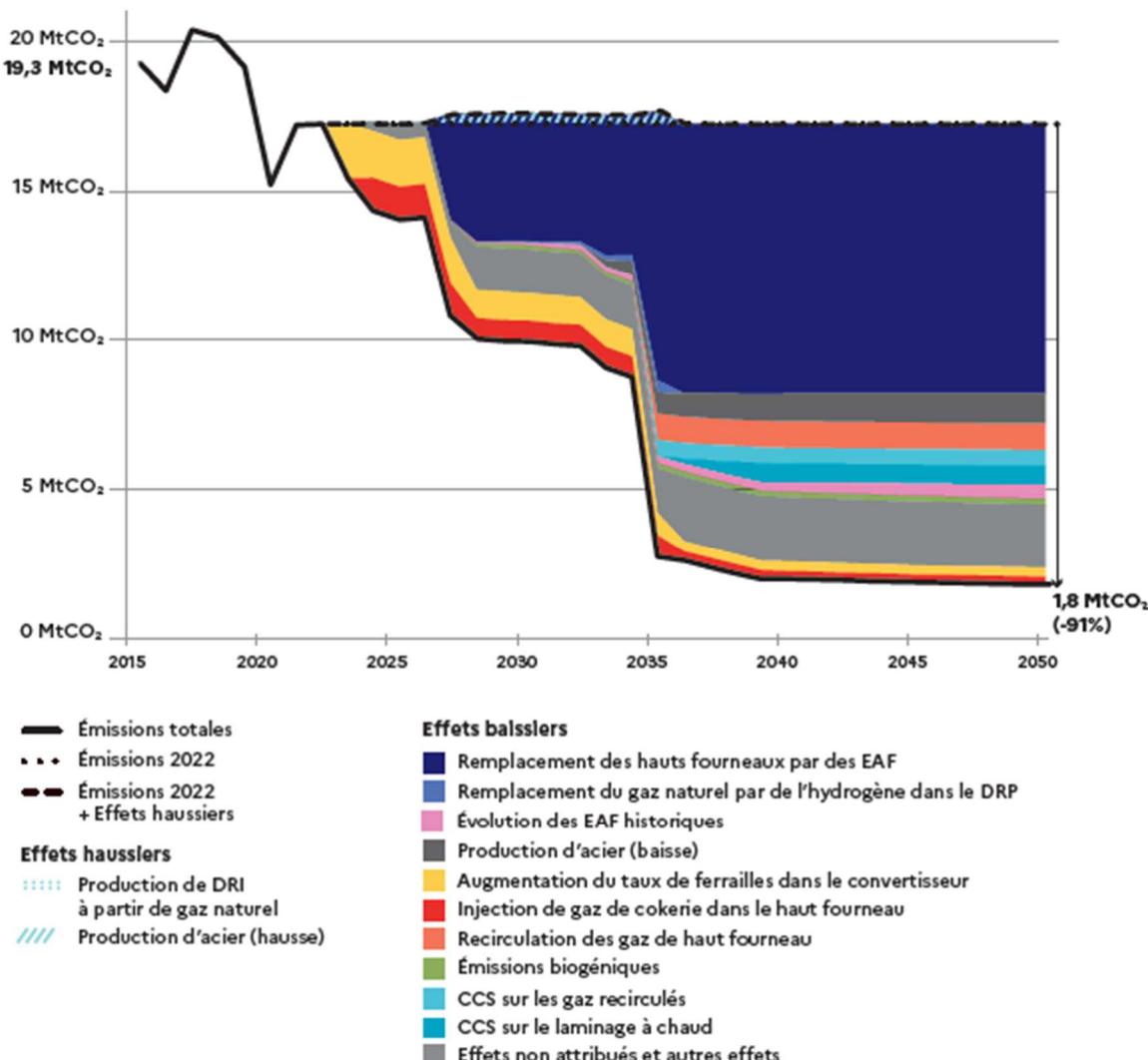
4.5.2. Une décarbonation technologique diversifiée entre le maintien d'un haut fourneau, la réduction directe par hydrogène et l'électrolyse du fer

Les voies technologiques sont diversifiées de façon à anticiper leurs risques et donc maximiser les chances de réussir la décarbonation de la sidérurgie. Tout d'abord, une partie des installations de la voie haut fourneau est maintenue, pour une capacité de production de 2 Mt de fonte, et est décarbonée à 61 % par une hausse légère du taux de ferrailles⁵⁹, le remplacement de 15% du charbon injecté dans le haut fourneau par du biocharbon (2029) et par l'injection de gaz de cokerie (2024) puis la recirculation des gaz de haut fourneau avec captage et stockage du CO₂ séparé (2035). En parallèle, la voie DRI-EAF est progressivement développée, en 2026 puis en 2035, à travers l'ouverture de 6,4 Mt de capacités de fours à arc électrique, qui sont en partie alimentés en DRI via la construction de 2,9 Mt de capacités de réacteurs DRP. Par ailleurs, les fours à arc électrique existants sont décarbonés via une amélioration de leur efficacité énergétique, leur électrification et le remplacement total des consommations de charbon fossile en 2043 par un mix comprenant 50% de déchets plastiques et 50% de biocharbon. Les fours à arc électrique existants intègrent également du fer vierge, sous forme de HBI (8% en 2050), et de fer issu d'électrolyse (17%). Enfin, plusieurs petites capacités d'électrolyse directe du fer sont ouvertes entre 2033 et 2045, jusqu'à atteindre une capacité cumulée de 0,75 Mt. Cela permet de prévenir des contraintes sur le gisement de ferrailles (en quantité ou en qualité) et de potentiellement diversifier leurs débouchés en pénétrant les marchés requérant des qualités d'acier plus élevées. Tel que considéré dans ce scénario, l'électrolyse du fer n'est donc pas un levier de décarbonation (qui aurait pu être appliquée en remplacement des hauts fourneaux) mais de maîtrise de la qualité de l'acier dans la filière électrique. Cette technologie n'apparaît donc pas dans la Figure 91, qui ne présente que les émissions directes de la sidérurgie (excluant notamment celles associées à la consommation d'électricité).

Les émissions directes annuelles de la sidérurgie française se réduisent de moitié en 2030 et de 91 % en 2050 par rapport à 2015 (Figure 91). En cumulé, 169 MtCO₂ sont émises entre 2023 et 2050, soit 65% de moins que si les émissions étaient restées constantes au niveau de 2022. *Sobriété et diversification* est donc légèrement plus émetteur que les autres scénarios, du fait de la pérennisation d'un haut fourneau, mais surpassé toujours l'objectif de la SNBC 2 pour l'industrie (-81% d'émissions annuelles). Sur les 318 MtCO₂ de baisses d'émissions cumulées, 56 % (235 MtCO₂) restent attribuables au remplacement des hauts fourneaux par des fours à arc électrique, du fait du développement de la voie DRI-EAF, qui évite 9 MtCO₂/an en 2050. La recirculation des gaz de haut fourneau et le captage et stockage de CO₂ représentent 10% de ces

⁵⁹ Le taux de ferrailles dans le convertisseur n'est pas maximisé de sorte à favoriser l'utilisation des fours à arc électrique nouvellement construits et à conserver un taux d'utilisation suffisant (>80%) pour le haut fourneau subsistant.

baisses, évitant environ 2 MtCO₂/an sur les installations de la voie haut fourneau qui subsistent. Enfin, les efforts de sobriété dans ce scénario (baisse de production) participent à hauteur de 5% aux réductions d'émissions, en évitant environ 1 MtCO₂/an.



Cle de lecture : En 2040, l'ensemble des évolutions ayant eu lieu depuis 2022 aura entraîné une baisse cumulée de 15 MtCO₂/an des émissions annuelles par rapport à celles de 2022, principalement du fait du remplacement de hauts fourneaux par des fours à arc électrique⁶⁰.

Figure 91. Scénario Sobriété et diversification - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO₂ par effets cumulés entre 2022 et 2050

Ce scénario requiert un total de 7 milliards d'euros d'investissements. En raison d'un développement plus mesuré de la voie DRI-EAF, les 2,4 milliards d'euros qu'elle nécessite (DRP et EAF) ne représentent que la moitié des 4,5 milliards d'euros investis dans la sidérurgie, mais s'y ajoutent 2,5 milliards d'euros pour la construction et le renouvellement d'électrolyseurs par les acteurs de l'énergie. La décarbonation des fours à arc électriques existants entre 2026 et 2050 représente, quant à elle, 29% des investissements dans la sidérurgie, essentiellement du fait du développement de fours à induction. En comparaison, le reste de la décarbonation de la voie primaire et le développement de l'électrolyse directe du fer ne représentent, respectivement, que 12% et 5% des investissements dans la sidérurgie.

⁶⁰ Parmi ces effets baissiers, les effets non attribués sont hérités des effets de la hausse du taux de ferrailles dans les convertisseurs ainsi que de l'injection de gaz de cokerie, rendus caducs au moment de la fermeture des hauts fourneaux. Par ailleurs, les émissions biogéniques correspondent aux émissions liées à l'intégration de biocharbon.

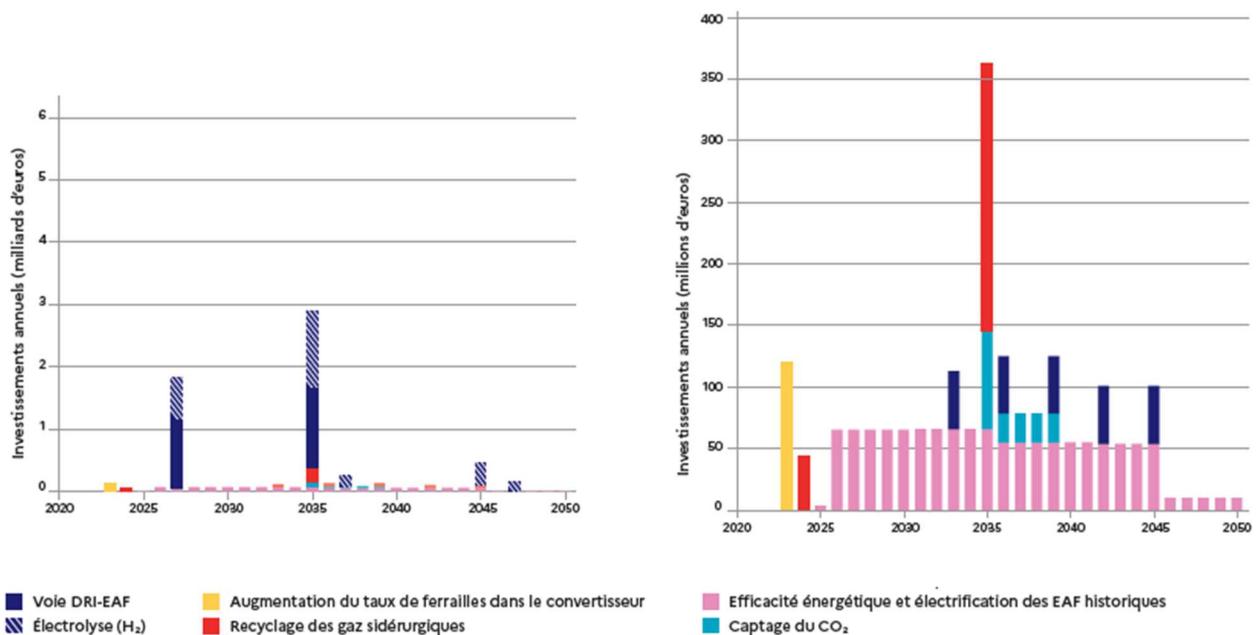


Figure 92. Scénario Sobriété et diversification - Chroniques d'investissements annuels, tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite)

Conditions de réussite

Le succès du scénario *Sobriété et diversification* repose sur plusieurs hypothèses et conditions.

- Il suppose un effort significatif de **sobriété**, notamment foncière, impliquant une utilisation optimisée du bâti existant (ex. : mobilisation des logements vacants).
- Il repose sur le développement réussi d'un nombre plus important de technologies non matures que les autres scénarios, telles que l'électrolyse directe du fer.

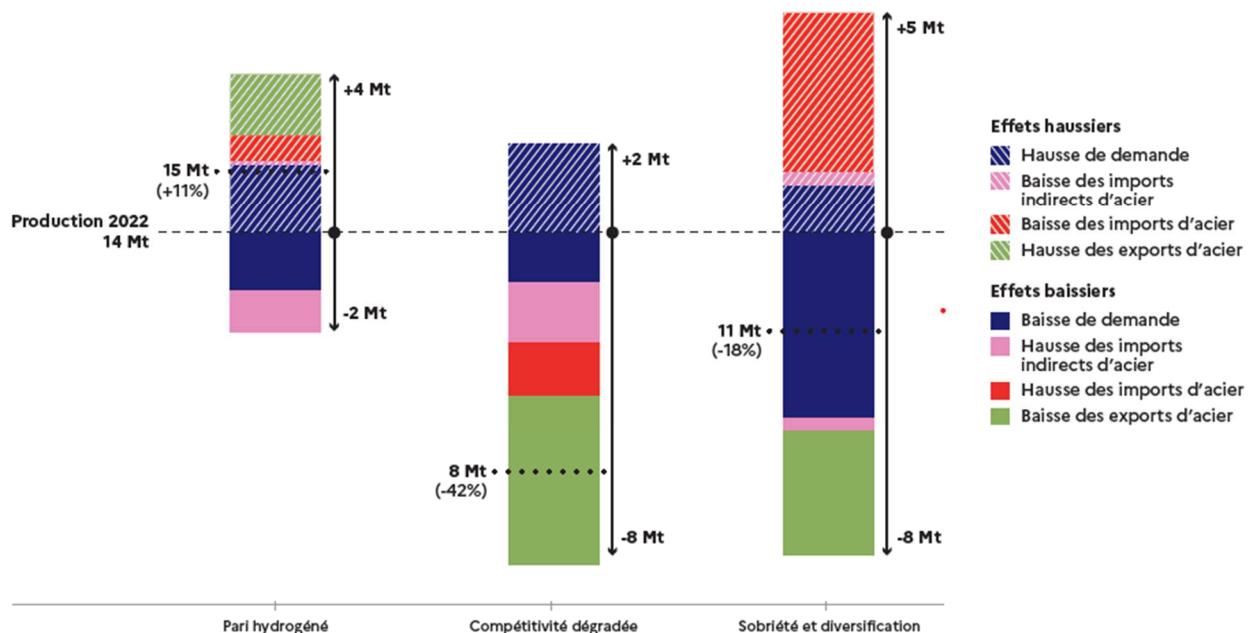
Pour aller plus loin

- Afin de maximiser la décarbonation de la sidérurgie, l'ensemble des hauts fourneaux pourrait être fermé, comme pour les autres scénarios, et remplacé par des installations basées sur la réduction du fer par hydrogène ou par (bio)gaz couplée à du CCS, ou encore sur l'électrolyse directe du fer.
- En parallèle, un **développement plus ambitieux de l'électrolyse directe du fer** aurait pu être considéré, au-delà d'un simple apport complémentaire en fer vierge dans les fours à arc électrique existants. La modularité de ces installations permettrait en effet de décentraliser la filière primaire sur le territoire, ce qui répartirait la charge sur le réseau électrique ainsi que les pressions sur la ressource en eau, tout en renforçant les capacités d'adaptation aux risques climatiques. L'interruptibilité de ces installations permettrait également de lisser la charge sur le système électrique

5. Analyses comparées sur les perspectives de décarbonation de la filière sidérurgique

5.1. Production

La production d'acier ne progresse que dans *Pari hydrogéné* (+11% entre 2022 et 2050), à la faveur d'une demande globalement stable et d'un effort de relocalisation. C'est dans *Compétitivité dégradée*, à l'inverse, que la production recule le plus (-42%) du fait de la délocalisation de la sidérurgie (housse des imports et baisse des exports) et en dépit d'une hausse de la consommation. Dans *Sobriété et diversification*, la production est réduite de 18% du fait des mesures de sobriété, mais un important effort de relocalisation permet d'en limiter l'effet sur la production.



Cle de lecture : Dans *Compétitivité dégradée*, les secteurs ayant davantage recours à l'acier sont responsables d'une croissance de 2 Mt de la demande annuelle d'acier entre 2022 et 2050 (en hachures bleues), qui est partiellement compensée par une décroissance de la demande dans les autres secteurs (en bleu). L'accroissement de cette demande entraîne une hausse des imports d'acier (en rouge) et de produits transformés contenant de l'acier (imports indirects d'acier, en rose), dépendante des hypothèses de commerce international, qui causent également une baisse des exports d'acier (en vert). Au bilan, la production d'acier passe de 14 Mt en 2022 (ligne en tirets) à 14 + 2 - 8 = 8 Mt en 2050 (trait pointillé), soit une baisse de 42%.

Figure 93: Décomposition de l'évolution de la production annuelle d'acier entre 2022 et 2050 selon les effets de la demande et du commerce international, par scénario

5.2. Emissions cumulées

L'ensemble des scénarios dépasse l'objectif issu de la SNBC 2 de réduction des émissions annuelles directes de 81% entre 2015 et 2050 : elles sont réduites de 95% dans les scénarios *Pari hydrogéné* et *Compétitivité dégradée* et de 91% dans *Sobriété et diversification*. Dans tous les scénarios, la fermeture de hauts fourneaux pour les remplacer par des installations DRI-EAF est le principal contributeur à la réduction des émissions en évitant, en cumulé entre 2023 et 2050, de 177 MtCO₂ à 285 MtCO₂ selon les scénarios (Figure 94)⁶¹. C'est le maintien d'un haut fourneau qui explique la plus faible réduction d'émissions dans *Sobriété et diversification*. Le captage et stockage de CO₂ est également un levier commun à tous les scénarios, dans des proportions variables : il évite 10 MtCO₂ (3% des effets baissiers) dans *Pari hydrogéné*, 25 MtCO₂ (6%) dans *Compétitivité dégradée* et 17 MtCO₂ (6%) dans *Sobriété et diversification*. Enfin, le niveau de production a un effet sensible sur les émissions. En hausse dans *Pari hydrogéné*, il entraîne l'émission de 22 MtCO₂ supplémentaires entre 2023 et 2050. En baisse du fait des délocalisations dans *Compétitivité dégradée*, il évite 50 MtCO₂ sur le territoire national. Similairement, l'effet de la sobriété sur la production dans *Sobriété et diversification* évite 15 MtCO₂.

⁶¹ En comptant les émissions liées à l'utilisation de gaz naturel dans le DRP.

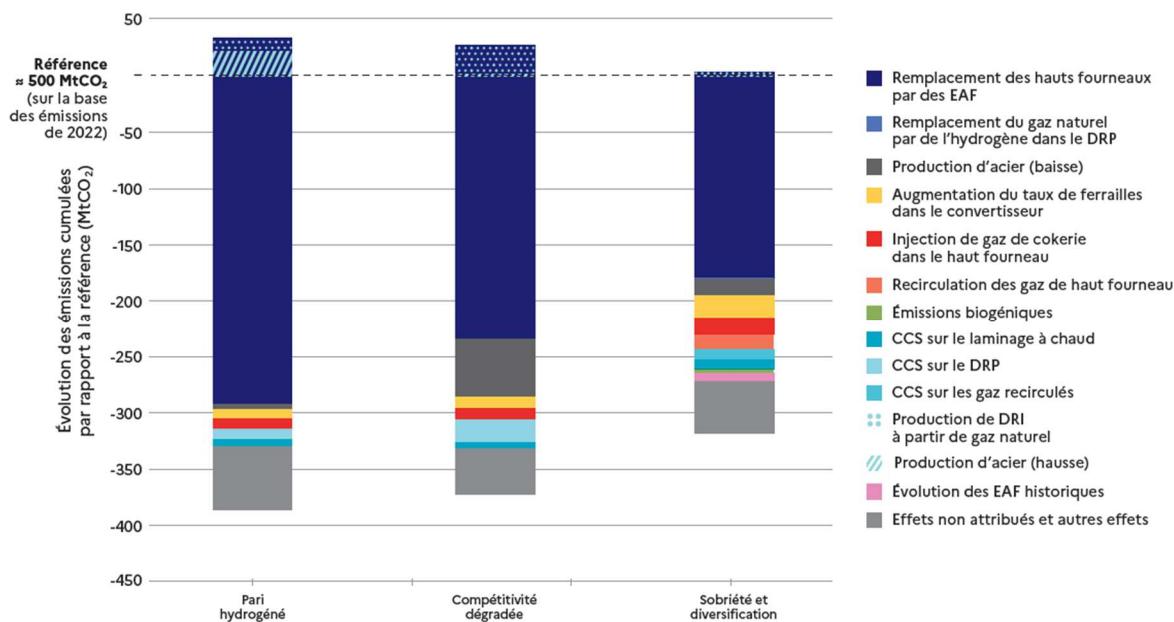
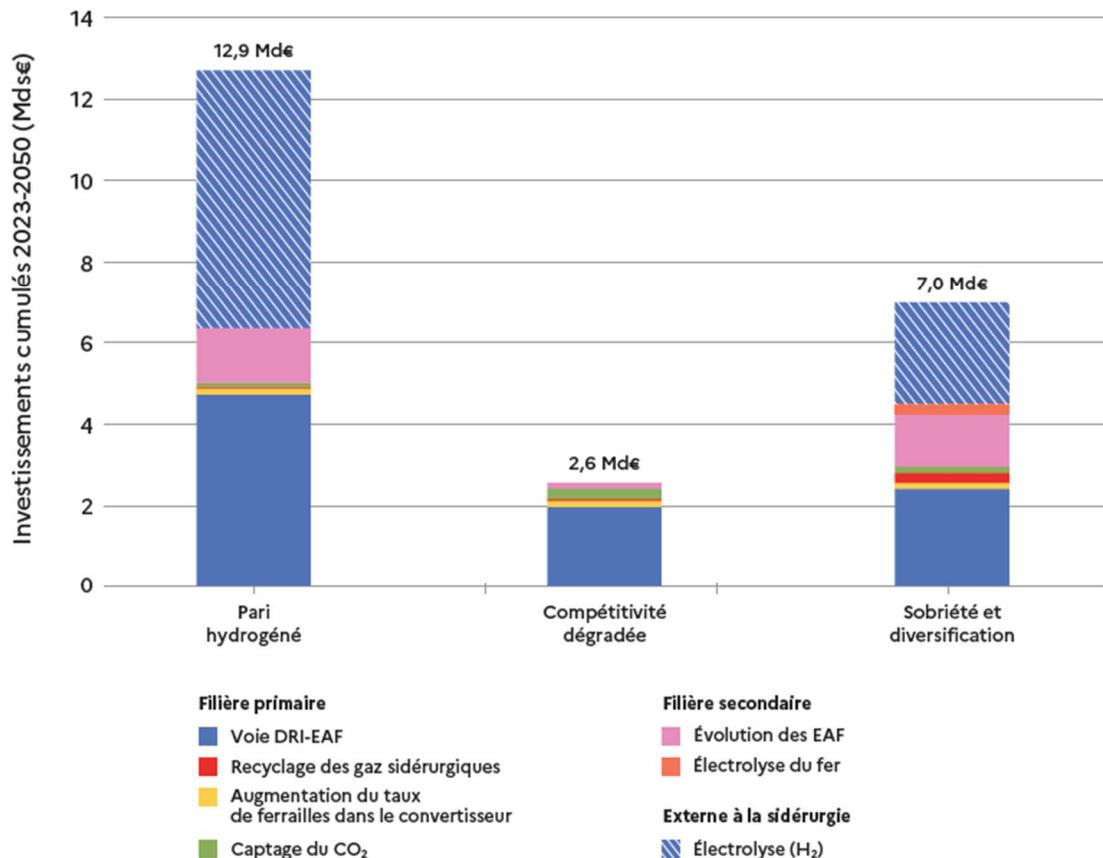


Figure 94 :Décomposition des émissions évitées et ajoutées en cumulé entre 2023 et 2050, par effet et par scénario⁶²

5.3. Investissements

La transition vers la voie DRI-EAF est l'évolution la plus coûteuse pour la décarbonation de la sidérurgie, d'autant plus si l'on considère les investissements liés à la production d'hydrogène par électrolyse (en hachures dans la Figure 95). La transition des fours à arc électriques est également particulièrement onéreuse du fait de l'installation de fours à induction. Par conséquent, ***Pari hydrogéné*** est le scénario mobilisant les sommes les plus importantes (12,9 milliards d'euros entre 2023 et 2050), dont la moitié est liée à la construction et au renouvellement des électrolyseurs. ***Sobriété et diversification*** mobilise des investissements moins importants (7 milliards d'euros), dont un tiers est lié à l'électrolyse. Enfin, ***Compétitivité dégradée*** requiert des investissements relativement faibles au regard des deux autres scénarios car il ne fait pas le choix de l'électrification, ni dans la voie DRI-EAF (réduction par gaz naturel), ni pour la décarbonation des fours à arc électrique existants.

⁶² Parmi les effets baissiers, les effets non attribués sont hérités des effets de la hausse du taux de ferrailles dans les convertisseurs ainsi que de l'injection de gaz de cokerie, rendus caducs au moment de la fermeture des hauts fourneaux.



5.4. Energie

Dans tous les scénarios, la fermeture des hauts fourneaux et la transition vers la voie DRI-EAF entraînent, dans le mix énergétique de la sidérurgie, le remplacement massif du charbon par de l'hydrogène ou du gaz naturel (pour *Compétitivité dégradée*), bien qu'une partie subsiste dans *Sobriété et Diversification* avec le maintien d'un haut fourneau (voir Figure 96). Du fait de la production d'hydrogène par électrolyse, **le soutirage d'électricité sur le réseau pour la sidérurgie est quintuplé dans *Pari Hydrogéné*** (36 TWh en 2050, contre 7 TWh en 2022) et **triplé dans *Sobriété et diversification*** (23 TWh en 2050), qui profite des effets de la sobriété et du maintien d'un haut fourneau. L'approvisionnement en électricité est donc une contrainte clé de ces scénarios, d'autant plus dans le contexte d'électrification massive lié à la transition écologique. C'est du fait de ces contraintes qu'une transition vers la réduction directe par gaz naturel est considérée dans *Compétitivité dégradée*, entraînant, entre 2022 et 2050, un triplement des consommations de gaz réseau mais une réduction des consommations électriques (-5% entre 2022 et 2050)⁶³.

⁶³ La consommation de gaz naturel augmente également dans *Pari hydrogéné* (+33%). En effet, la transition vers la voie DRI-EAF prive les installations de laminage de l'accès aux gaz sidérurgiques, qui sont remplacés par du gaz naturel.

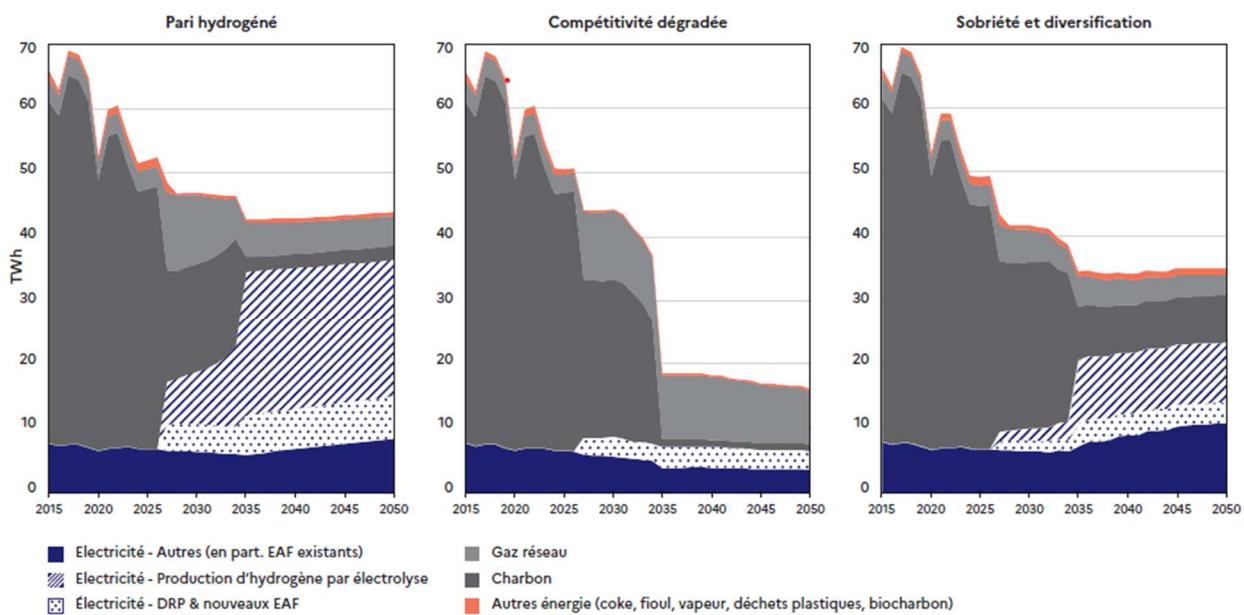


Figure 96. Évolution des consommations d'énergie dans les trois scénarios entre 2015 et 2050

5.5. Ferrailles

Le gisement de ferrailles est la deuxième contrainte majeure pour la décarbonation de la sidérurgie. Dans *Pari hydrogéné*, la consommation de ferrailles externes⁶⁴ croît de 59% en 2050 par rapport à 2022 (Figure 97). Cette hausse est tirée par la filière primaire, où le taux de ferrailles s'établit à 40% en 2035, contre 15% aujourd'hui, si bien que la part de ferrailles externes consommées par la filière primaire passe de 10% à 40% d'ici 2035, révélant une concurrence nouvelle avec la filière secondaire. Dans *Sobriété et diversification*, la consommation de ferrailles augmente également fortement d'ici 2030 (+53% par rapport à 2022), du fait d'une plus forte incorporation de ferrailles (50% à partir de 2040), mais l'effort de sobriété permet de contenir la hausse à +21% en 2050. A contrario, la quantité de ferrailles consommée dans *Compétitivité dégradée* chute de 15% par rapport à 2022 du fait de la délocalisation de la production et d'une faible incorporation de ferrailles dans l'acier primaire (30%). Le gisement en ferrailles français devrait être suffisant, mais les échanges commerciaux de ferrailles devraient, quant à eux, s'adapter à ces besoins. Aujourd'hui, plus de la moitié des ferrailles françaises sont exportées du fait d'une trop faible qualité et du coût trop élevé du sur-tri et de la décontamination, tandis qu'une part des besoins est importée⁶⁵. Si ce taux d'exportation se maintenait (à défaut de mettre en place des mesures protectionnistes à l'export), la sidérurgie française devrait importer 3,6 fois plus de ferrailles dans *Pari hydrogéné* (4,3 Mt en 2050), comparé à aujourd'hui, et 2 fois plus dans *Sobriété et diversification*. En revanche, dans *Compétitivité dégradée*, presque aucune importation ne serait nécessaire à partir de 2040.

⁶⁴ Par opposition aux ferrailles internes, qui correspondent à la récupération de chutes internes (déchets pré-consommation), les ferrailles externes sont des déchets d'acier collectés et recyclés (post-consommation).

⁶⁵ Voir ADEME, Pierrick DRAPEAU, Louis OLLION, Guillaume BOUYER. 2023. Étude du potentiel de recyclage de l'acier, de l'aluminium et du cuivre en France. 206 pages.

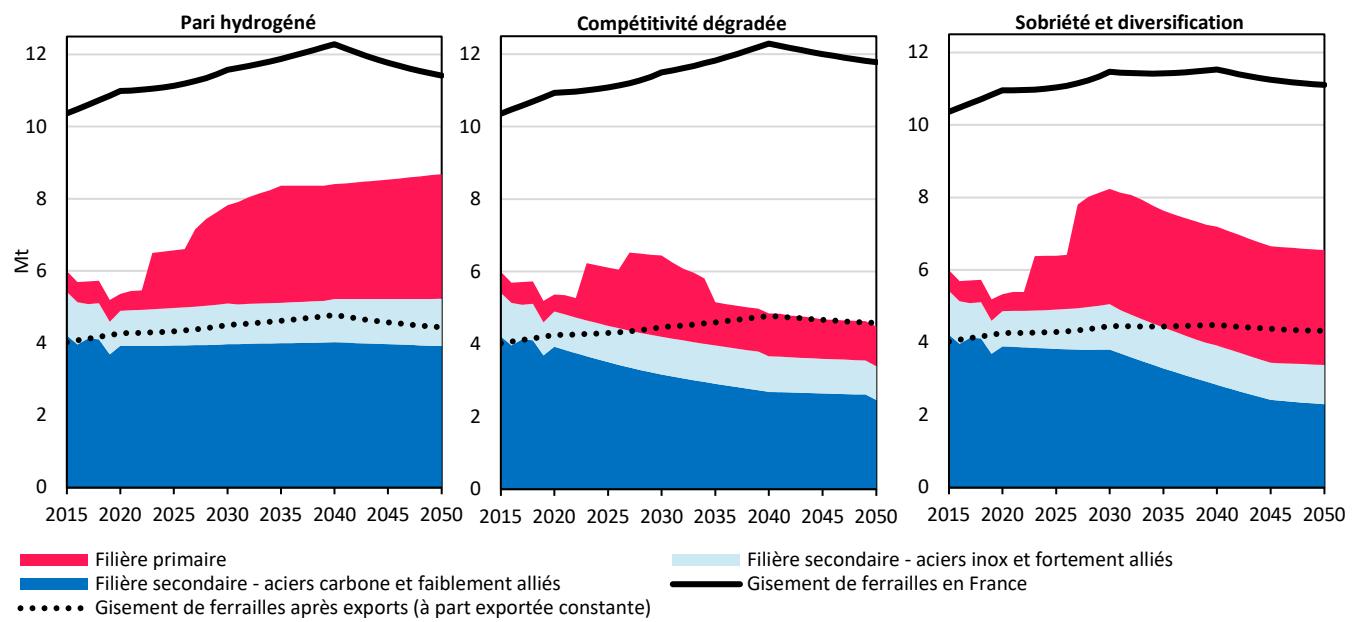


Figure 97. Gisement et consommation de ferrailles externes dans les trois scénarios entre 2015 et 2050

5.6. Chaines de valeur

Historiquement, les sites sidérurgiques se sont implantés à proximité des ressources en minerai de fer et en charbon. Du fait du tarissement des ressources, les sites sidérurgiques en Europe se sont progressivement déplacés à proximité des zones portuaires pour pouvoir réceptionner les matières premières en provenance de pays étrangers. Désormais, les impératifs climatiques qui pèsent de plus en plus sur l'industrie ont ouvert la voie à une possible nouvelle réorganisation de la chaîne de valeur de l'acier. La transition écologique de la sidérurgie redessine la chaîne de valeur internationale de l'acier en introduisant notamment le HBI comme matériau transformé intermédiaire. Au même titre que la production d'ammoniac ou d'*efuels*, la production de fer pré-réduit (HBI) – voire directement d'acier – permet de valoriser à l'export les conditions favorables à la production d'hydrogène propres à certains pays (ex. : disponibilité en énergies d'origine éolienne ou photovoltaïque).

Un certain nombre de travaux institutionnels et académiques estiment qu'il serait pertinent d'un point de vue technico-économique de séparer l'étape de production de fer primaire sous forme de DRI ou HBI (la plus émissive et la plus gourmande en énergie) de l'étape de préparation et de transformation de l'acier (cf. encadré 5). Cette configuration est illustrée dans *Compétitivité dégradée*, où l'essentiel de l'acier est directement importé, de même qu'une grande partie du HBI (Figure 98).

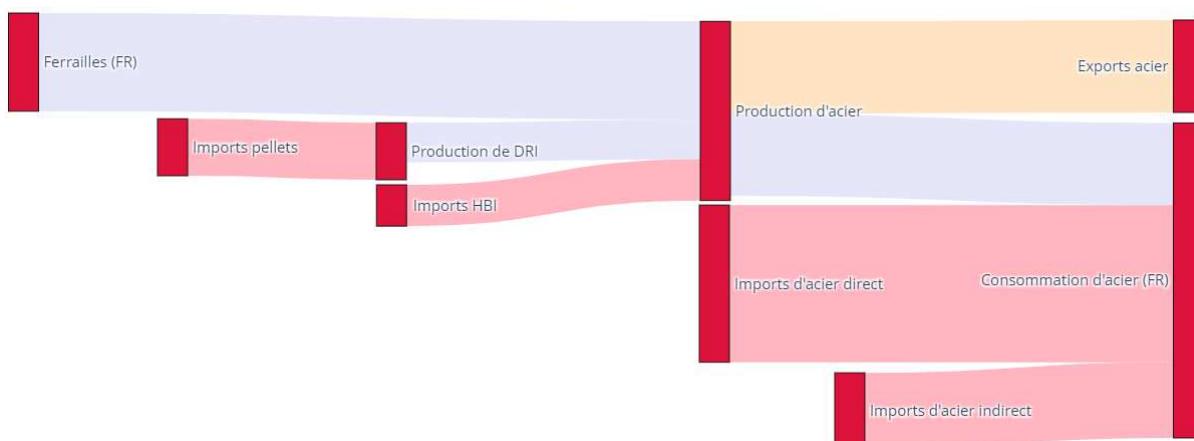


Figure 98. Scénario Compétitivité dégradée - Chaîne de valeur de l'acier en 2050

Encadré 5 : une chaîne de valeurs internationalisée ?

Historiquement, les sites sidérurgiques se sont implantés à proximité des ressources en minerai de fer et en charbon. Du fait du tarissement des ressources, les sites sidérurgiques en Europe se sont progressivement déplacés à proximité des zones portuaires pour pouvoir réceptionner les matières premières en provenance de pays étrangers. Désormais, les impératifs climatiques qui pèsent de plus en plus sur l'industrie ont ouvert la voie à une possible nouvelle réorganisation de la chaîne de valeur de l'acier. Pour se décarboner, il est largement admis dans la littérature scientifique que la filière primaire aura besoin de sources d'énergie décarbonée à un prix compétitif et du minerai de fer de bonne qualité pour la production de DRI. Il se trouve que certaines régions du monde présentent ce type d'avantages comparatifs : c'est par exemple le cas pour le Brésil, l'Afrique du Sud ou encore l'Australie. De plus en plus de travaux institutionnels et académiques entretiennent ainsi l'idée selon laquelle il serait pertinent d'un point de vue technico-économique de séparer l'étape de production de fer primaire sous forme de DRI ou HBI (la plus émissive et la plus gourmande en énergie) de l'étape de préparation et de transformation de l'acier. Dans un travail prospectif de 2022, l'entreprise Shell illustre en exemple une telle configuration de la chaîne de valeur à horizon 2050. Il est important de noter que dans ces nouvelles conditions, l'Europe (à l'exception peut-être de la Suède) deviendrait une région importatrice de fer prétrétié et se « contenterait » de réaliser la production d'acier à partir de HBI et de ferrailles."

Une étude technico-économique compare 12 typologies de chaînes de valeur d'export d'acier entre l'Australie (pays producteur) et le Japon (pays consommateur) [177]. Selon les auteurs, l'exportation de ressources énergétiques et minières pour une production d'acier dans le pays consommateur serait moins efficace sur le plan de la consommation énergétique, qu'un cas de figure où la production d'acier primaire serait localisée à proximité de l'extraction des ressources minières et de la production d'énergies renouvelables. Par ailleurs, l'acier aurait un coût de revient moyen 45 % plus élevé dans le premier cas normal contre 32 % dans le second.

La pertinence technico-économique de cinq différentes chaînes de valeur de l'acier en Europe a également été étudiée avec les cas de l'Allemagne, l'Espagne et la Finlande [178]. En partant du constat que l'accès à une électricité décarbonée bon marché est le premier élément de compétitivité pour la production d'acier bas-carbone, la production d'hydrogène par électrolyse est étudiée au niveau de deux localisations favorables pour leur énergie solaire abondante : le Maroc en Afrique du Nord ainsi que dans le désert de l'Atacama au Chili. Parmi les configurations possibles pour une chaîne de valeur d'acier décarbonée en Europe : l'hydrogène bas-carbone peut être exporté directement en Europe par canalisation (dans le cas du Maroc) ou par bateau sous forme liquéfié (dans le cas du Chili), l'hydrogène peut être utilisé localement pour produire du DRI bas-carbone qui sera ensuite transporté en Europe sous forme de HBI pour produire de l'acier ou bien, la production d'acier brut peut se faire en totalité au Maroc ou au Chili que les pays européens se « contenteraient » d'importer directement. Ces configurations sont comparées à une chaîne de valeur entièrement intégrée au niveau européen de la production d'hydrogène à partir d'un mix d'énergies renouvelables solaire PV/éolien jusqu'à la production d'acier brut en passant par l'étape DRI. Les résultats de cette analyse semblent plus nuancés que dans l'étude A. Devlin & A. Yang (2022) [177] ou ce qui peut être suggéré par la vision prospective de Shell (2022) [179]. En effet, G. Lopez et al. (2023) [178] conclut qu'une chaîne de valeur intégrée d'acier décarboné peut être compétitive face à des importations, tout particulièrement dans des pays où le coût de l'électricité renouvelable déjà faible sera amené à encore diminuer à l'avenir (cas du solaire en Espagne). Des trois pays européens étudiés, l'Espagne apparaît en effet comme le plus propice économiquement à une chaîne complète H₂-DRI-EAF et ce malgré sa proximité géographique avec le Maroc lui faisant bénéficier de plus faibles coûts de transport de l'hydrogène. Dans le cas le plus défavorable, l'importation directe d'acier brut en Espagne en provenance du Maroc en 2030 aurait un coût de revient ne représentant que 96 % du coût du même acier produit intégralement en Espagne. A horizon 2050, ce ratio serait de 100 %, autrement dit, les deux coûts de revient sont strictement identiques. Dans le cas de l'Allemagne, l'importation de HBI ou directement d'acier brut en provenance du Maroc sont les configurations les plus intéressantes économiquement : le coût de revient final de l'acier représente entre 85 et 90 % du coût du même acier produit par une chaîne intégrée H₂-DRI-EAF en Allemagne. C'est également une option moins coûteuse que l'importation d'hydrogène, qu'elle soit en provenance du Maroc ou du Chili. Le cas de la Finlande est encore plus marqué car toutes les configurations avec importation (hydrogène, HBI ou acier brut) rivalisent économiquement avec une production locale ce qui, d'après G. Lopez et al. (2023) [178], laisse suggérer que la Finlande semble condamnée à devenir importatrice à l'avenir d'au moins un élément de la chaîne de valeur de l'acier. En plus de la pertinence économique que pourrait avoir une séparation de la chaîne de valeur de l'acier, G. Lopez et al. (2023) [178] y voit également une opportunité pour établir de nouvelles relations commerciales avec certains pays du Sud. L'importation de matières premières ou de produits peu transformés en provenance de ces pays a été historiquement privilégiée mais désormais, la décarbonation de certaines chaînes de valeur dont l'acier est une opportunité pour plusieurs pays émergeants d'accélérer leur développement ainsi que la transition vers des énergies décarbonées. C'est le cas par exemple de pays d'Afrique du Nord mais également de l'Afrique du Sud.

H. Trollip et al. (2022) [180] a justement étudié le cas d'une production de DRI à partir d'hydrogène bas-carbone en Afrique du Sud pour exportation en Europe. L'article met en avant les potentiels bénéfices que les deux régions pourraient tirer

d'une telle configuration de la chaîne de valeur. Pour l'Europe, cela permettrait de réduire les coûts de revient de la production d'acier décarboné mais également de libérer de la disponibilité en électricité décarboné pour d'autres usages. Pour l'Afrique du Sud, le développement de cette industrie contribuerait à la stabilité économique du pays grâce à une diversification des sources de revenus et une amélioration des finances publiques mais ce serait également l'opportunité d'une transition vers une économie décarbonée.

En revanche, comme expliqué en sous partie 4.2, le scénario *Pari Hydrogéné* illustre une configuration dans laquelle les pouvoirs publics jouent un rôle déterminant dans la recomposition des chaînes de valeur à travers un soutien appuyé sur l'accès à une électricité bas-carbone et compétitive, et plus globalement à travers des politiques de maintien des filières industrielles historiques et stratégiques sur le territoire. Cette implication des pouvoirs publics dans ce scénario s'inscrit dans un contexte tendanciel et structurel de régionalisation des flux commerciaux afin, notamment, de limiter la vulnérabilité des filières industrielles aux conséquences du réchauffement climatique sur les chaînes logistiques. Ainsi, comme l'illustre la Figure 99, la quasi-totalité de l'approvisionnement en fer à partir de DRI est produit en France et permet la création d'une filière industrielle et de plusieurs centaines d'emplois dans des bassins industriels en reconversion pour faire face aux enjeux de la transition⁶⁶. Seule la dépendance incompressible en pellets est conservée vis-à-vis des fournisseurs historiques de minerais de fer. Par ailleurs, des échanges commerciaux sur les produits sidérurgiques et les ferrailles se maintiennent en particulier avec les pays européens.

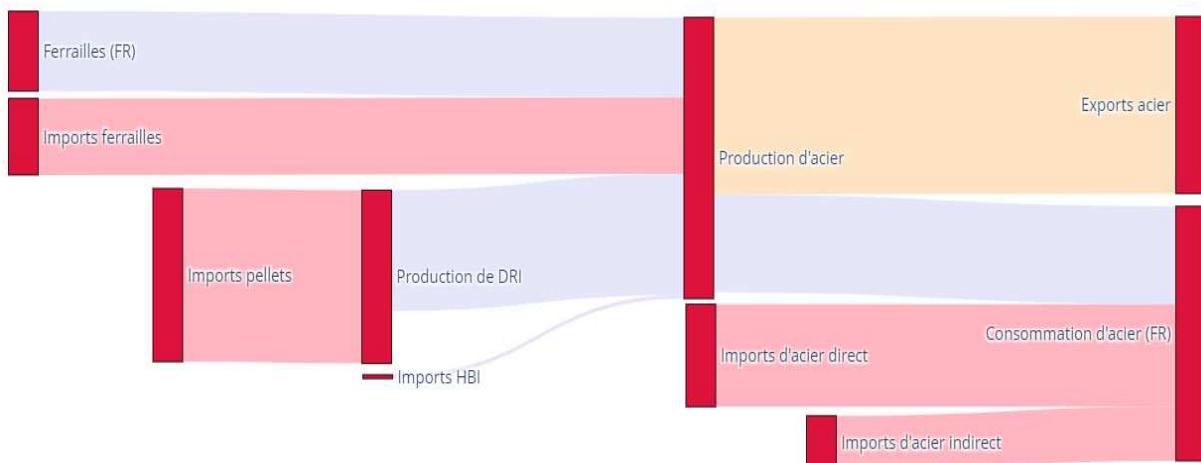


Figure 99: Scénario *Pari hydrogéné* - Chaîne de valeur de l'acier en 2050

Le scénario *Sobriété et diversification* s'inscrit également dans le contexte de relocalisation des flux évoqué dans *Pari hydrogéné*. Il tend en revanche à mettre en lumière une stratégie plus diversifiée en matière de technologies de décarbonation avec, notamment, une part plus importante du recyclage afin de limiter les dépendances aux importations de minerai de fer pour alimenter le haut fourneau (après transformation en aggloméré) et l'électrolyse du fer, et de pellets pour la production de DRI sur le territoire⁶⁷ (Figure 100).

⁶⁶ Le DRI est produit en transformant des pellets, qui sont importés car souvent produits à proximité de la mine de fer. Les émissions liées à la pelletisation (procédé similaire à l'agglomération) échappent alors à l'inventaire territorial.

⁶⁷ On suppose ici par simplification que le DRI/HBI produit en France est consommé en France en priorité. En outre, le fer pré-réduit produit peut être consommé sur site ou vendu ailleurs en France ; c'est pourquoi des achats de HBI apparaissent en Figure **Erreur ! Document principal seulement.** pour *Sobriété et diversification* alors que le solde commercial y est exportateur.

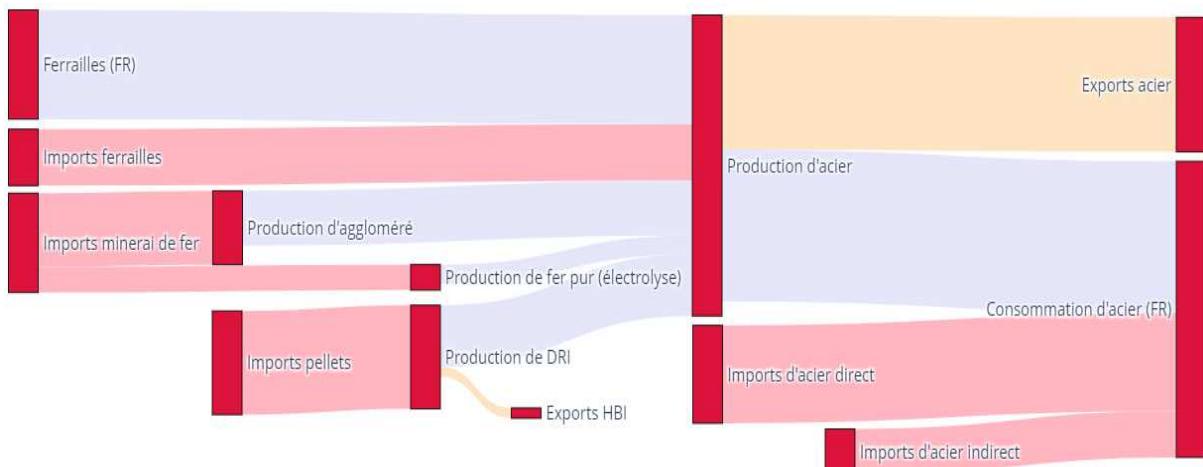


Figure 100 : Scénario Sobriété et diversification - Chaîne de valeur de l'acier en 2050

5.7. Coût de production

Sur la base d'une reconstruction du coût de production et de l'évolution des prix entre 2015 et 2022 (cf. section 3.8), la part de l'achat du minerai de fer dans le coût de production de l'acier primaire⁶⁸ est en moyenne de 40%, contre 31% pour le charbon. Ces valeurs moyennes masquent néanmoins des variations importantes entre les années avec la hausse des prix des intrants énergétiques, des matières premières et avec le déploiement de nouvelles technologies pour la décarbonation.

Sur la base des itinéraires technologiques modélisés dans les trois scénarios, la Figure 101 illustre l'évolution du coût de production en considérant des prix constants⁶⁹. Ainsi, plusieurs constats s'observent :

- Les coûts énergétiques sont doublés, dans *Pari Hydrogéné* et *Sobriété et diversification*, du fait de la transition du charbon vers l'électricité et l'hydrogène. En revanche, dans *Compétitivité dégradée*, ils sont réduits de 30% en raison du meilleur rendement de la réduction du minerai par gaz naturel et du faible prix du gaz.
- Le coût des intrants ferreux double également d'ici 2050 dans *Pari hydrogéné* et *Compétitivité dégradée* et augmente de 50% dans *Sobriété et diversification*, du fait de l'intégration de pellets, de ferrailles et de HBI, plus onéreux que le minerai de fer.

Cette évolution de structure multiplie ainsi, à prix constants, le coût de production de l'acier primaire par **1,8**, **1,2** et **1,5**, respectivement, dans *Pari hydrogéné*, *Compétitivité dégradée* et *Sobriété et diversification*.

⁶⁸ Périmètre considéré : sites des voies hauts fourneaux et DRI-EAF, hors électrolyseurs et installations produisant du HBI à usage externe uniquement.

⁶⁹ Prix considérés constants (pour un industriel fortement consommateur d'énergie) : 25 €/t_{CO2} émis ; 51 €/MWh_{électricité} ; 28 €/MWh_{gaz réseau}^{PCI} ; 71 €/t_{minerai de fer} ; 124 €/t_{pellet} ; 237 €/t_{ferrailles} (moyennes 2015-2022) ; 380 €/t_{HBI} (hypothèse ADEME) ; 42 €/t_{CO2} capté. Les « autres OPEX » correspondent aux autres dépenses d'exploitation (ex. : salaires, achats de ferroalliages, de castine).

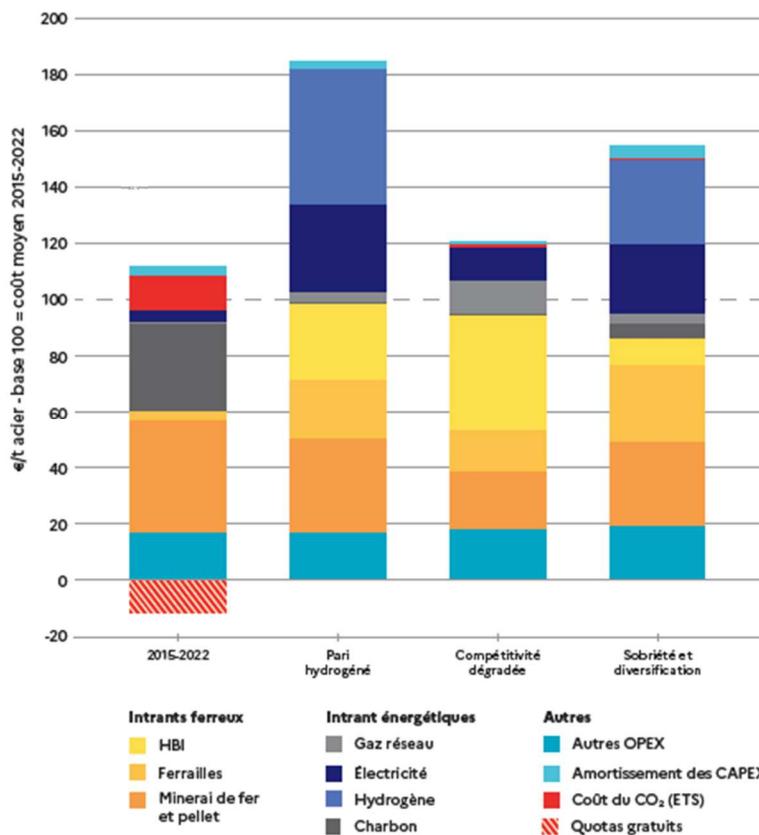
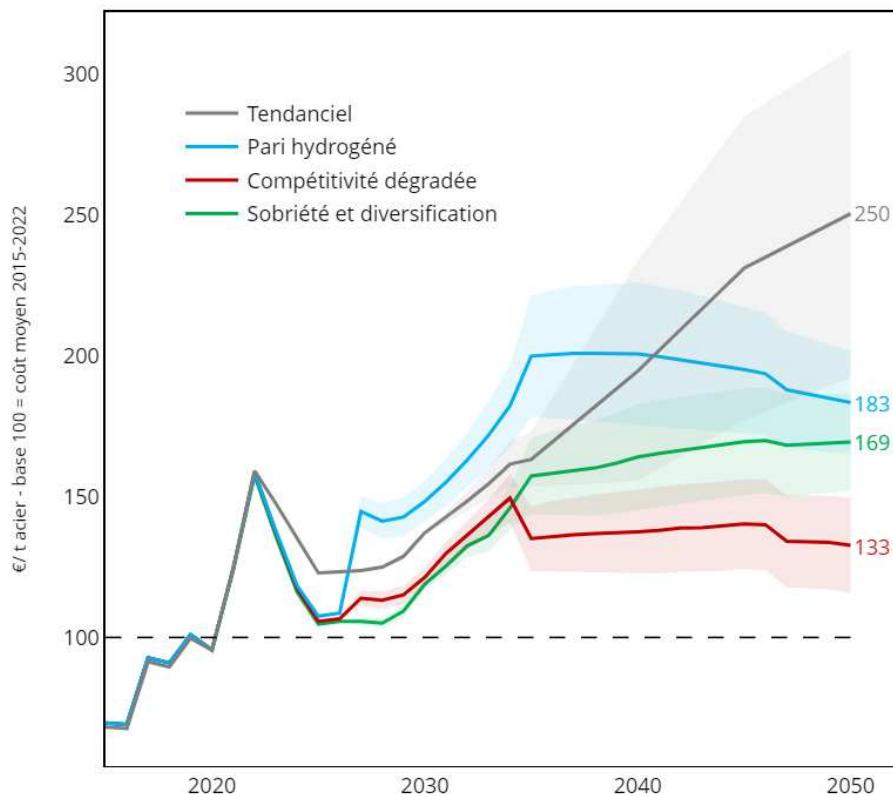


Figure 101 : Comparaison de la structure du coût de production de l'acier primaire entre aujourd'hui et 2050, dans les trois scénarios, à prix constants

La prise en compte d'hypothèses d'évolution des prix (cf. Annexe 2) ne modifie que marginalement ce constat. D'ici 2050, le coût de production est alors multiplié par **1,7 à 2** dans *Pari hydrogéné*, par **1,2 à 1,5** dans *Compétitivité dégradée* et par **1,5 à 1,9** dans *Sobriété et diversification* (Figure 102). Ces hausses doivent néanmoins être mises au regard d'une multiplication par **1,9 à 3,1** du coût de production si les installations de la filière hauts fourneaux se maintenaient jusqu'en 2050, du fait de la hausse du prix du CO₂. Les scénarios de décarbonation apparaissent donc « rentables » vis-à-vis du tendanciel dès la décennie 2040. Ce n'est, cela dit, pas le cas à court terme pour *Pari hydrogéné*, si bien que des mécanismes incitatifs semblent

nécessaires à la réalisation de ce scénario, lesquels pourront également améliorer la compétitivité par rapport aux coûts de la production d'acier bas carbone dans les autres pays.



5.8. La réduction directe par hydrogène : une technologie privilégiée qui reste particulièrement coûteuse dans les conditions actuelles de prix

Indépendamment des scénarios présentés jusqu'ici, qui permettent d'évaluer dynamiquement les coûts associés à différents déploiements technologiques, une comparaison statique du coût des différentes options technologiques est une indication intéressante pour arbitrer entre elles (voir encadré ci-dessous). La réalisation d'analyses de sensibilité sur ces coûts permet, en particulier, de déterminer les intrants qui ont le plus d'influence sur la rentabilité de chaque technologie et d'identifier les seuils à partir desquels une technologie devient rentable – ou plus rentable qu'une autre.

Les résultats chiffrés obtenus sont toutefois à considérer avec prudence ; ils révèlent essentiellement des ordres de grandeur et des tendances mais n'ont pas de valeur prédictive. Ils nécessitent en effet de fixer certaines hypothèses particulièrement incertaines, pouvant varier selon les acteurs et dans le temps, telles que les prix des intrants, du CO₂ ou le taux de rentabilité attendu pour les projets (taux d'actualisation).

Enfin, ces évaluations économiques ne suffisent pas à arbitrer entre les options technologiques, ce qui exige de prendre en compte d'autres considérations, telles que leur maturité, leur intérêt environnemental ou leur cohérence avec des choix de politique industrielle (ex. : souveraineté, emplois).

Dans ce qui suit, les surcoûts et coûts d'abattement sont calculés en considérant une **production constante de 10 Mt d'acier** – soit un niveau semblable à la production annuelle actuelle de la filière primaire française, une durée de projet de 15 ans et un taux d'actualisation de 4,5 %. Les écarts de dépenses d'exploitation sont considérés constants dans le temps et les hypothèses de prix permettant de les calculer sont identiques aux prix constants considérés en section 4.1 ⁷⁰.

⁷⁰ Hormis le prix du CO₂, considéré à 88 €/tCO₂ (moyenne entre le 1er janvier et le 26 octobre 2023).

Méthode – surcoût et coût d'abattement des technologies

Deux indicateurs peuvent être mobilisés pour comparer le coût de développement de technologies : leur surcoût et leur coût d'abattement.

Le **surcoût** associé à une technologie est défini comme l'écart entre les dépenses liées à l'application d'une technologie (somme actualisée, selon un taux d'actualisation r , des dépenses d'investissement – CAPEX – et d'exploitation – OPEX, sur une durée fixée T) et celles associées au maintien des installations existantes (ici les installations de la filière hauts fourneaux, qui impliquent également des investissements de remise à neuf pour leur prolongation).

Cet indicateur permet d'évaluer la rentabilité d'une technologie. Si le surcoût est nul, elle est rentable au bout de la durée du projet. S'il est négatif, elle est rentable avant la fin du projet et permet de dégager un profit. S'il est positif, le projet n'est pas rentable. En particulier, si les gains en dépenses d'exploitation sont trop faibles (voire si $\Delta OPEX$ est positif), les investissements peuvent ne jamais être rentabilisés, quelle que soit la durée du projet.

$$\text{Surcoût} = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{\Delta \text{CAPEX}_t + \Delta \text{OPEX}_t}{(1+r)^t}$$

Le **coût d'abattement** d'une technologie est défini comme le surcoût de cette technologie rapporté à la quantité cumulée de CO₂ qu'elle évite sur la durée du projet par rapport à la situation où les installations existantes sont maintenues.

Cet indicateur permet de comparer l'efficacité-coût des leviers de décarbonation dans une logique de priorisation, mais doit être complété par d'autres indicateurs tels que la maturité, le niveau de décarbonation permis par chaque technologie ou leur articulation entre eux⁷¹.

$$\text{Coût d'abattement} = \frac{\text{Surcoût}}{\sum_{t=0}^{T-1} \Delta \text{CO}_2_t}$$

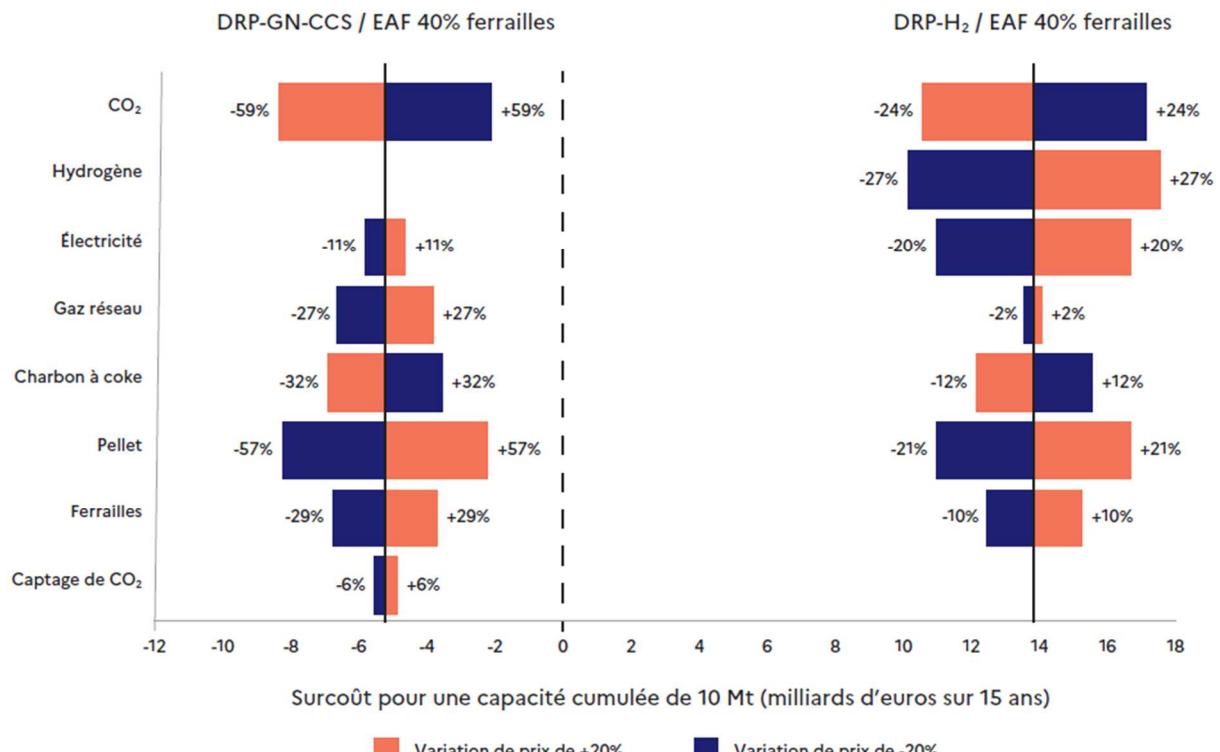
5.8.1. Une voie DRP-H₂ coûteuse sauf à renchérir le prix du CO₂ et baisser ceux de l'électricité et de l'hydrogène, contre une voie DRP-GN-CCS déjà rentable

Dans les conditions actuelles de prix, la transition des hauts fourneaux français vers la réduction directe par hydrogène représenterait un surcoût de près de 14 milliards d'euros sur une période de 15 ans⁷², du fait des investissements associés et de coûts de production plus élevés. A l'inverse, une transition vers la réduction directe par gaz naturel couplée au captage du CO₂ serait rentable en moins de 15 ans (5,3 milliards d'euros seraient dégagés sur la période).

Comme l'illustre l'analyse de sensibilité en Figure 103, ce surcoût (ou gain) est fortement dépendant des prix du CO₂, des intrants ferreux et des intrants énergétiques – hydrogène et électricité pour la filière DRP-H₂ et gaz naturel pour la filière DRP-GN-CCS.

⁷¹ Dans un objectif de décarbonation totale, et non partielle, la mise en œuvre de technologies peu onéreuses mais ne réduisant que partiellement les émissions peut en effet créer un verrouillage technologique contre-productif.

⁷² On considère ici une transition de la filière haut fourneau vers des installations DRP-EAF (à l'hydrogène ou au gaz naturel) intégrant 40% de ferrailles.



Cle de lecture : Si le prix de l'électricité diminuait de 20%, toutes choses égales par ailleurs, cela abaisserait de 20% le coût sur 15 ans de la transition des hauts fourneaux vers la filière de réduction directe par hydrogène, le portant à 10 milliards d'euros, et cela augmenterait de 11% le gain sur 15 ans associé à la transition vers la filière de réduction directe par gaz naturel couplée au CCS, le portant à 6 milliards d'euros.

Figure 103. Analyse de sensibilité du coût de la transition de la filière hauts fourneaux vers les voies DRP-GN-CCS / EAF et DRP-H₂ / EAF en fonction du prix des intrants.

En conservant les autres prix constants, la transition vers la réduction directe par hydrogène devient rentable en 15 ans pour un **prix du CO₂ dépassant 162 €/tCO₂** (point A1 en Figure 104), lequel ne serait atteint qu'en 2037 dans le scénario « WAM » de la Commission Européenne⁷³. Alternativement, la réduction directe par hydrogène devient rentable, à prix du CO₂ constant, pour un **prix de l'électricité inférieur à 25 €/MWh** (deux fois plus faible que le prix actuel payé par les industriels électro-intensifs), ce qui correspond à un prix de l'hydrogène de 2,4 €/kgH₂ (point A2).

D'ici à ce que le prix du CO₂ évolue, une transition vers la réduction directe par hydrogène nécessite donc d'activer différents leviers tels que des contrats d'approvisionnement en énergie à bas prix, une réduction des marges, une augmentation du prix de vente de l'acier bas carbone (on parle de *premium vert*) ou encore des aides publiques à l'investissement et au fonctionnement⁷⁴.

La réduction directe par gaz naturel resterait quant à elle rentable en 15 ans tant que le prix du CO₂ reste supérieur à 58 €/tCO₂ (contre 88 €/tCO₂ en 2023) et que le prix du gaz naturel reste inférieur à 49 €/MWh (point A3), ce qui est 75% plus élevé que le prix actuel.

Dans des conditions de prix très particulières, la réduction directe par hydrogène pourrait néanmoins s'avérer moins coûteuse que la réduction par gaz naturel couplée au CCS. Pour cela, toutes choses égales par ailleurs, le prix de l'électricité devrait être inférieur à 10 €/MWh – soit 1,6 €/kgH₂ (point B1) ou le prix du gaz supérieur à 112 €/MWh (point B2).

⁷³ « WEM » (With Existing Measures) et « WAM » (With Additional Measures) sont des scénarios réalisés par la Commission Européenne en 2017 simulant, respectivement, l'effet des mesures actuelles et des mesures planifiées par les États Membres.

⁷⁴ Les aides au fonctionnement sont des aides à l'achat d'intrants ; elles sont particulièrement utiles dans cette situation où les dépenses d'exploitation représentent l'essentiel du surcoût.

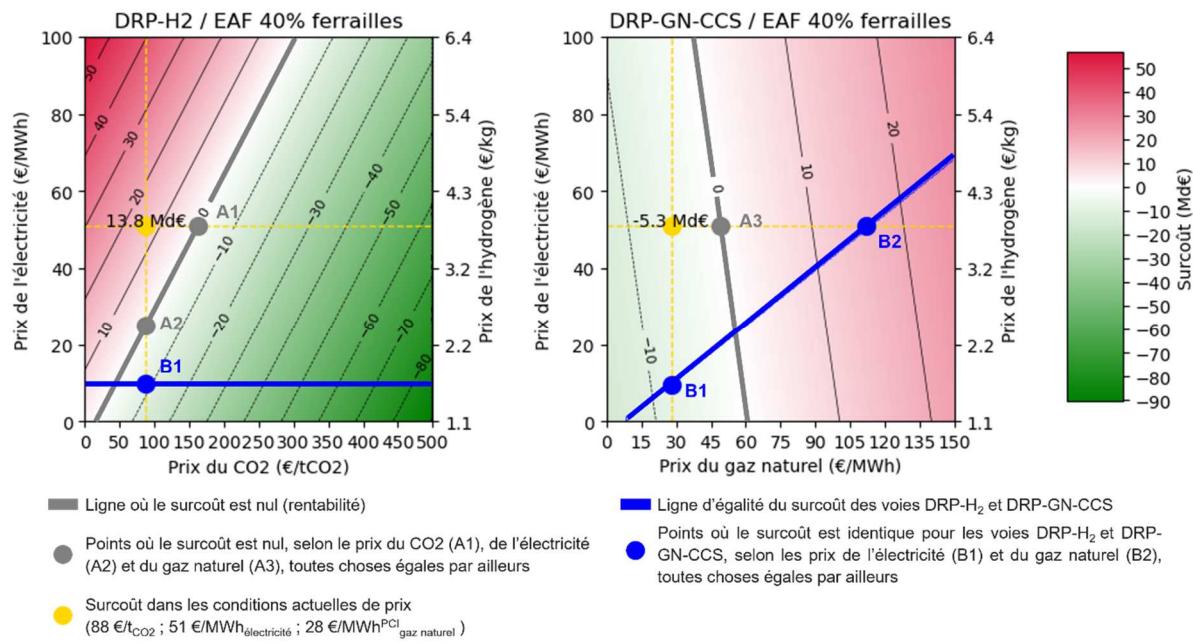


Figure 104. Surcoût sur 15 ans des voies DRP-H₂ / EAF, en fonction des prix de l'électricité et du CO₂ (à gauche), et DRP-GN-CCS / EAF, en fonction des prix de l'électricité et du gaz naturel (à droite)⁷⁵

Il est donc probable que la réduction par gaz naturel couplée au CCS reste plus rentable que la réduction par hydrogène, à moins que la préférence des consommateurs pour un acier à base d'hydrogène renouvelable – ou bas carbone – s'exprime sous la forme d'un avantage de prix par rapport à un acier conçu à partir de gaz naturel et impliquant le captage et stockage de CO₂.

En outre, **les critères hors coût justifient de favoriser la voie DRP-H₂**. La voie DRP-GN-CCS est en effet grevée par le risque de dépendance aux imports de gaz naturel fossile et les émissions indirectes associées, la priorisation d'alternatives au CCS lorsqu'elles existent et l'incertitude quant au développement d'une infrastructure de transport et stockage de CO₂⁷⁶.

5.8.2. Décarboner les hauts fourneaux : un gain rapide en attendant le déploiement de la réduction directe et de l'électrolyse du fer ?

Afin de juger de l'efficacité d'une technologie de décarbonation, on peut ramener le surcoût qu'elle représente au volume d'émissions de CO₂ qu'elle permet d'éviter : il s'agit du **coût d'abattement** de la technologie. Sur 15 ans et en intégrant 40% de ferrailles, le surcoût de 14 milliards d'euros associé à la réduction directe par hydrogène permet d'éviter l'émission de 249 MtCO₂, soit un coût d'abattement de **43€/tCO₂**. La réduction directe par gaz naturel couplée au captage du CO₂ permet d'éviter légèrement moins d'émissions (235 MtCO₂) mais offre un gain de 5,3 milliards d'euros, qui se traduit par un coût d'abattement négatif de **-27€/tCO₂**.

Comme présenté en Figure 105, les technologies de décarbonation des hauts fourneaux existants sont les plus efficaces (notamment l'injection de gaz de cokerie, à - 123€/tCO₂, et l'augmentation du taux de ferrailles, à - 72€/tCO₂, toutes deux rentables en moins de 2 ans) mais ne permettent qu'une réduction partielle des émissions de CO₂⁷⁷. Ces évolutions sont donc

⁷⁵ Le prix de l'hydrogène est indiqué sur l'axe des ordonnées de droite. Il est issu d'un calcul de coût de production par électrolyse en cohérence avec le prix de l'électricité indiqué sur l'axe des ordonnées de gauche.

⁷⁶ Impliquant également une incertitude forte sur le prix du transport et stockage de CO₂, considéré ici à 42 €/tCO₂ capté.

⁷⁷ La conversion des hauts fourneaux en fours à arc électrique alimentés en ferrailles serait également particulièrement efficace (rentable en 1,5 an) mais ne répondrait pas au besoin d'une filière primaire, alimentée en fer vierge.

utiles à mettre en œuvre le temps que les conditions technico-économiques permettent le déploiement à grande échelle des solutions bas-carbone.

Pour une décarbonation profonde, l'**électrolyse du fer semble être la solution la plus efficace** (- 30€/tCO₂ et rentable en 5 ans), et pourrait donc s'imposer à l'issue de son développement technologique si cette donnée se confirme.

Les filières DRP-GN-CCS et, surtout, DRP-H₂, présentent les coûts d'abattement les plus élevés, mais leur avance technologique et les inconvénients hors coûts de la voie DRP-GN-CCS laissent penser que **la voie DRP-H₂ demeure la solution décarbonée la plus appropriée à court terme**.

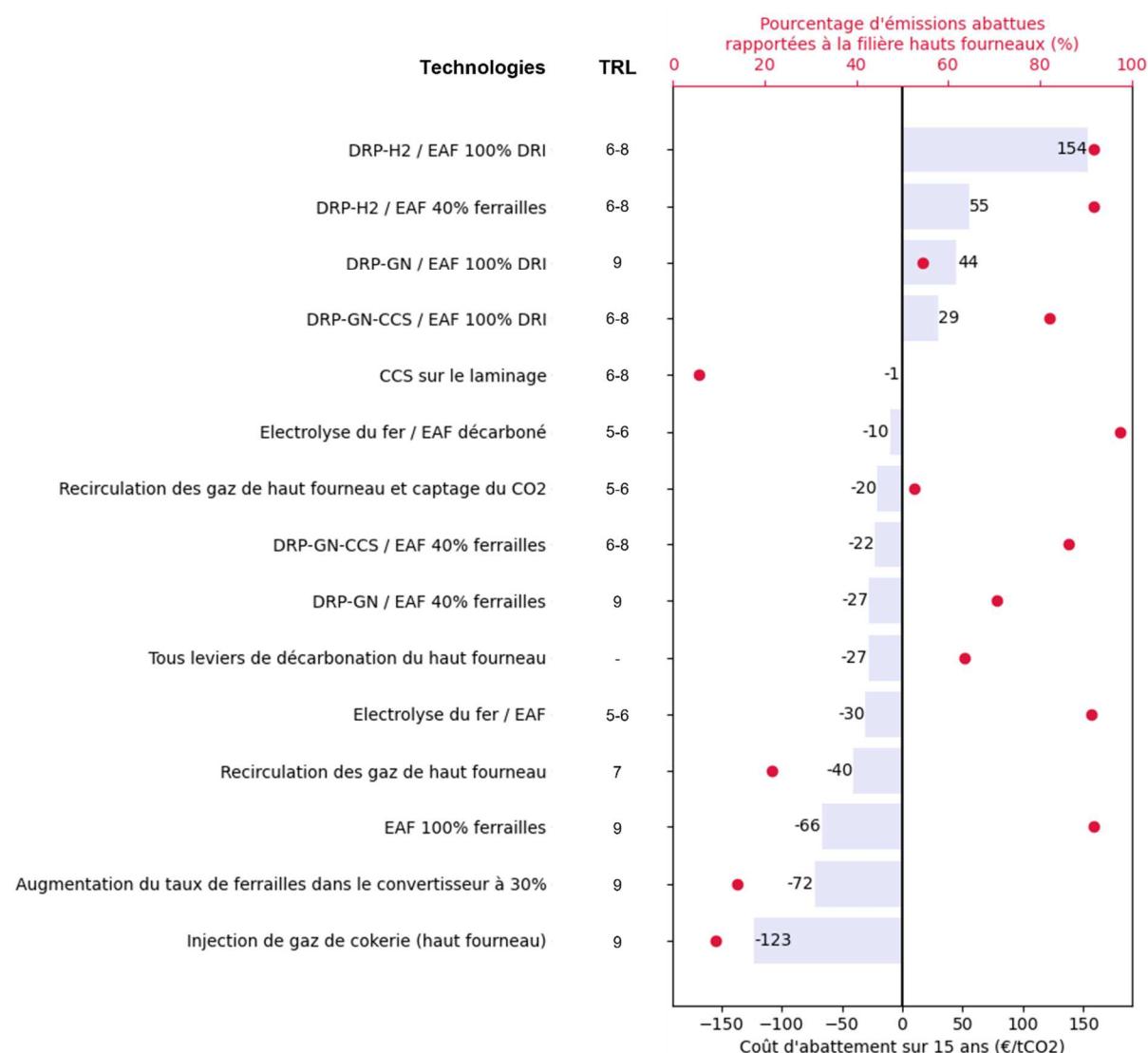


Figure 105. Comparaison des coûts d'abattement (barres bleues) et des émissions abattues (points rouges) pour les voies de décarbonation de la filière primaire

5.9. Premières réflexions sur le besoin en emplois directs à horizon 2050

Les effectifs totaux de la filière sidérurgique, tels qu'ils ont été recensés en moyenne chaque trimestre entre 2009 et 2019, ont diminué de 18 % (contre 7 % pour l'industrie manufacturière), avec un total en 2019 d'environ 35 000 personnes en France métropolitaine contre environ 43 000 dix ans auparavant⁷⁸. Une baisse significative est observée en particulier sur les sites dédiés à la première et seconde transformation (-22 %), c'est-à-dire hors filière primaire, dont les effectifs ont malgré tout été réduits de 17 %, et hors filière électrique, dont la baisse d'effectifs n'a été que de 3 %. Les facteurs pour expliquer cette érosion sont multiples. Outre les stratégies d'entreprise visant à réduire les coûts de production et rester compétitif face à la concurrence européenne et internationale, certains débouchés traditionnels de la sidérurgie ont connu d'important ralentissements d'activité, comme le secteur pétrolier et gazier ou celui du bâtiment.

L'évolution à moyen et long terme des effectifs de la sidérurgie dépendra également de la compétitivité vis-à-vis de la concurrence et du dynamisme des secteurs consommateurs d'acier. En complément, les choix qui seront faits en matière de stratégie de décarbonation et de vitesse plus ou moins ambitieuse de déploiement des technologies devraient également apporter des changements dans les volumes d'emplois et les compétences nécessaires au développement et à la pérennité de la filière. **En attendant des études supplémentaires spécifiquement dédiées à l'évolution de l'emploi dans la filière sidérurgique dans un contexte de décarbonation, des ordres de grandeur sont proposés.** Sur la base d'une intensité emploi pour la production d'acier, des hypothèses d'évolution de la production en 2050 par rapport à 2022, et du déploiement des leviers technologiques, les effectifs de la filière primaire pourraient ainsi croître de plus de 80 % dans le meilleur des cas (scénario *Pari hydrogéné*) et diminuer de 20 % dans le pire des cas (scénario *Compétitivité dégradée*). Par ailleurs, une hausse de 18 % est projetée dans le cadre du scénario *Sobriété et diversification*. Ces estimations illustrent un bilan net très hétérogène et fortement dépendant de l'effet du développement du procédé DRI-EAF sur l'emploi de la filière primaire.

Concernant la filière électrique les scénarios envisagés dans ce Plan de Transition Sectoriel n'intègrent pas de rupture technologique mais modélisent uniquement des technologies d'amélioration de l'efficacité énergétique. À cet égard, outre d'éventuels besoins en compétences pour s'adapter à ces technologies, le volume des effectifs de cette filière devrait donc surtout dépendre du niveau de production. Ils augmenteraient de 2,2 % dans le scénario *Pari hydrogéné* et diminueraient respectivement de 34 % et 12 % dans les scénarios *Compétitivité dégradée* et *Sobriété et diversification*. Ces deux estimations illustrent les effets potentiels sur l'emploi, à l'horizon 2050, d'une perte de compétitivité vis-à-vis des concurrents européens et extra-européens et/ou de politiques axées sur la sobriété.

Parmi les limites de ce chiffrage, il est important de souligner que l'effet du déploiement des technologies de décarbonation dans l'industrie lourde est encore très peu documenté dans la littérature. De la même manière, les chiffres sont présentés par filière et ne reflètent pas d'éventuelles stratégies industrielles visant à se positionner sur les marchés en croissance. À titre d'exemple, il est supposé que la filière électrique conserve sa vocation à produire essentiellement des produits longs, en grande partie à destination du secteur du bâtiment, alors qu'en réalité une stratégie pourrait consister à réorienter une partie plus importante de sa production vers un autre secteur, voire de se positionner sur le marché des produits plats ou inox et fortement alliés à destination du secteur automobile. **Ces choix de stratégie sont non seulement difficilement anticipables à l'horizon 2050, mais ils sont surtout propres à chaque entreprise. Pour toutes ces raisons, les estimations sont à prendre avec précaution.**

⁷⁸ Estimations ADEME sur la base des données ACOSS-URSSAF après retraitement des données statistiques : non prise en compte des sites inférieurs à 5 salariés et/ou dont les déclarations d'activité, et donc d'effectifs, sont inférieures à 4 années après 2010. Les codes APE considérés regroupent la sidérurgie (code 24.10) qui intègre la filière primaire, la filière électrique et les autres sites de la métallurgie à chaud répertoriés sous ce code, la fabrication de tubes, tuyaux et profilés creux (code 24.20) et la métallurgie à froid (codes 24.31, 24.32, 24.33, 24.34).

6. Pistes d'action

A mesure des échanges avec les industriels et différentes parties prenantes de la filière, plusieurs pistes d'action pour contribuer à la décarbonation de l'acier ont émergé. Ces pistes d'action sont listées dans la figure

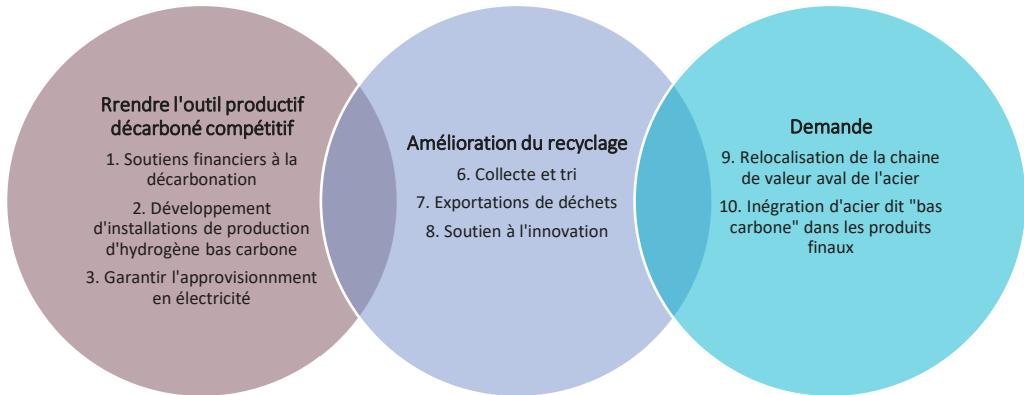


Figure 106: Pistes d'actions envisagées pour la décarbonation de l'industrie de l'acier

6.1. Rendre l'outil productif décarboné compétitif

6.1.1. Soutiens financiers pour maintenir une industrie compétitive

1. ACCELERER la décarbonation par différents dispositifs de soutien financier

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

A l'image d'un secteur industriel de première transformation capitaliste, les investissements pour décarboner l'acier sont très lourds, en particulier pour l'investissement dans de nouveaux modèles de production (DRP, nouveaux EAfs, électrolyse directe du fer). Ces nouveaux procédés nécessitent également d'effectuer des travaux de raccordement électrique.

Par ailleurs, l'incertitude sur l'évolution des prix du CO₂ et de l'électricité est relativement importante sur le moyen/long terme et pose un risque financier important sur la rentabilité de projets « de rupture ».

Différents mécanismes de soutien opérés par les pouvoirs publics peuvent être envisagés en fonction de la spécificité du projet, dont l'objectif est d'accélérer le déclenchement des investissements réalisés par les industriels :

- Mobiliser les dispositifs d'accompagnement français :
 - Appels à projets (AAP) pour le soutien à l'innovation et à la démonstration de technologies innovantes pour la décarbonation (AAP DEMIBAC / IBAC PME / Innovation Fund), en particulier pour l'électrolyse du fer qui n'est pas encore à un stade de développement commercial
 - Appels à projets pour le soutien aux investissements (CAPEX) dans des solutions matures de décarbonation de l'industrie dans le cadre notamment de France 2030 (ADEME)
 - Opérations Spécifiques du dispositif des Certificats d'Economies d'Energie (CEE) ;
 - Dispositif pour sécuriser les investissements dans de grands projets de décarbonation nécessitant à la fois une aide à l'investissement et une aide au fonctionnement (« aide à l'OPEX ») : [consultation](#) lancée par la DGE en juin 2024 pour un futur appel d'offres pour le soutien aux grands projets industriels de décarbonation „, en particulier les projets de captage et stockage du carbone, d'électrification et d'usage de l'hydrogène
- Mieux mobiliser les guichets européens de financement ex. : Fond Innovation, Horizon Europe, Feder, Fonds de Transition Juste, etc.

FORCES :

- Multiplicité des guichets incitatifs mis en œuvre dans le cadre du programme d'investissements France 2030, du Fond Chaleur et du fond économie circulaire

FAIBLESSES :

- Absence de visibilité pluriannuelle sur ces dispositifs fortement consommateurs d'argent public
- Au-delà d'un mécanisme de soutiens financiers de l'Etat, la mise en œuvre efficace d'outils économiques tels que le MACF (Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières) seraient nécessaires en complémentarité afin d'éviter des investissements échoués en préservant la souveraineté industrielle française

PARTIES PRENANTES IDENTIFIÉES :

- Task Force de la stratégie d'accélération décarbonation de l'industrie (SGPI)
- Task Force de la stratégie d'accélération recyclage (SGPI)
- Comité Stratégique de Filière « Mines et métallurgie »
- Comité Stratégique de Filière « déchets »
- Ministère de l'économie et des finances (DGE – Direction Générale des Entreprises)

PISTES D'ACTIONS :

- Programme France 2030 : 5 Mds d'Euros sur 5 ans pour décarboner l'industrie (*lancement d'un dispositif de type appels d'offres CCFD au second semestre 2024- cf. [dossier de presse de novembre 2023](#)*)
- Agrégation des besoins d'investissements des feuilles de route des 50 plus gros sites émetteurs et des [feuilles de route des Comités Stratégiques de Filières](#) (CNI), en cohérence avec les résultats des PTS, pour alimenter les travaux de planification et de design de nouvelles Politiques Publiques ainsi qu'engager les industriels au travers de contrats de transition écologique

- ADEME (Service Décarbonation de l'Industrie et Hydrogène)

POUR PLUS D'INFORMATIONS :

- France 2030
- Dispositif [CEE](#)
- Fond chaleur
- [Innovation Fund](#)
- O. Sartor et C. Bataille, 2019, [Decarbonising basic materials in Europe: How Carbon Contracts-for-Difference could help bring breakthrough technologies to market](#), IDDRI
- Agora Energiewende, 2020, [A Clean Industry Package for the EU](#), Berlin
- [Communication](#) de la Commission Européenne sur le paquet « Fit for 55 »
- [Dossier de presse du 22 novembre 2023](#) sur la signature des contrats de transition écologique de l'industrie



6.1.2. Développement d'installations de production d'hydrogène bas carbone

2. Soutenir le développement des installations de production d'hydrogène bas-carbone et adopter une consommation flexible d'hydrogène électrolytique

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

Afin d'assurer une compétitivité française, voir européenne, de la réduction directe de minerai de fer par hydrogène dans la durée, il est essentiel de soutenir le développement des installations de production d'hydrogène bas carbone pour générer des effets d'échelle, donner une garantie sur la pérennité d'approvisionnement et contenir son coût. Par ailleurs, afin de continuer à alimenter les DRP en période de pointe et limiter les coûts de consommation d'électricité, il est nécessaire d'adopter une consommation flexible d'hydrogène électrolytique en misant sur des stockages d'hydrogène, une flexibilité sur les intrants (flexibilité au gaz naturel pour certains DRP) ou une baisse temporaire des puissances consommées (effacement partielle).

La stratégie nationale française relative à l'hydrogène est en cours de révision. L'état a mis en consultation le 15 décembre 2023 les nouvelles orientations stratégiques de cette stratégie. Elle devrait être publiée d'ici fin 2024.

Dans le cas des infrastructures H₂, les stockages souterrains d'H₂ en cavités salines n'ont pas une localisation équitable sur tout le territoire (principalement vallée du Rhône et Grand Est, cf. étude RTE-GRT Gaz Enjeux du développement des infrastructures de stockage et de transport d'hydrogène associés au développement de l'électrolyse et leviers d'optimisation avec le système électrique). Cependant, l'accès à ces sites, via des connexions par pipes, permettrait une flexibilité des électrolyseurs et donc un cout de l'électricité moyen réduit (le cout de production d'hydrogène est à plus de 80% directement lié à l'électricité), rendant plus compétitif l'hydrogène.

FORCES :

- L'effacement possible des électrolyseurs aux heures où l'électricité est coûteuse leur permettra de bénéficier d'une fourniture d'électricité à meilleur prix moyen.

FAIBLESSES :

- Le développement des infrastructures hydrogène sera long donc nécessite une planification pour donner de la visibilité à l'ensemble des acteurs (industriels, gestionnaires de réseaux, etc.)

PARTIES PRENANTES IDENTIFIÉES :

- Task Force de la stratégie d'accélération décarbonation de l'hydrogène (SGPI)
- Ministère de l'économie et des finances (DGE, DGEC)
- ADEME (Service Décarbonation de l'Industrie et Hydrogène)

PISTES D'ACTIONS :

- Réalisation d'études soutenues dans le cadre de l'appel à projets Zones Industrielles Bas Carbone (ZIBAC) pour identifier les trajectoires de décarbonation possibles à horizon 2030-2050 des zones industrielles françaises les plus émettrices de gaz à effet de serre. Le développement des premières infrastructures H₂ (pipes et stockages) serait probablement à envisager d'ici 2030 pour les hubs industriels les plus émetteurs afin de réduire les couts de l'électricité via de la flexibilité
- Dispositif de soutien à la production d'H₂ (dit "mécanisme OPEX H₂") : 4 Mds d'euros (sur 15 ans) pour décarboner la production d'H₂ par électrolyse, principalement dans les secteurs industriels les plus émetteurs (acier et ammoniac). Ce dispositif devrait être lancé d'ici fin 2024 avec plusieurs tranches d'appels d'offres.

POUR PLUS D'INFORMATIONS :

- France 2030 : AAP ZIBAC : <https://agirpourlransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/20220204/favoriser-developpement-zones-industrielles-bas-carbone-zibac>
- Etude RTE-GRT Gaz mettant en avant les bénéfices de la flexibilité des électrolyseurs pour le réseau électrique : https://www.grtgaz.com/sites/default/files/2023-08/grtgaz_rte_etudeh2.pdf
- Stratégie nationale hydrogène mise en consultation le 15 décembre 2023 : <https://www.ecologie.gouv.fr/rendez-vous/consultation-nouvelle-strategie-francaise-de-ploiement-hydrogene-decarbone#:~:text=Un%20Conseil%20national%20de%20l,de%2010%20GW%20en%202035.>

6.1.3. Garantir l'approvisionnement en électricité

3. Faciliter le développement des infrastructures électriques pour garantir l'approvisionnement de grandes quantités d'électricité et favoriser l'accès à un prix de l'électricité compétitif

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

Si la filière de réduction directe par hydrogène se développe à pleine puissance, la consommation électrique de la sidérurgie pourrait être quintuplée localement sur les zones industrielles de Fos sur mer et Dunkerque (dans le scénario Pari hydrogéné) et s'ajoutera à l'électrification liée à la décarbonation des autres sites industriels présents. De nouveaux moyens de production décarbonés doivent donc être développés pour répondre à la hausse des consommations électriques. Par ailleurs, afin d'éviter une surcharge du réseau face aux puissances électriques nécessaires localement, des travaux importants devront être menés pour renforcer les infrastructures du réseau électrique.

Ces évolutions peuvent être facilitées par les actions suivantes :

1. Encourager la conclusion de contrats d'approvisionnement de gré à gré en électricité.
2. Planifier et prioriser les demandes de raccordement par secteur et par zone industrielle.
3. Étudier une répartition décentralisée des nouvelles installations sidérurgiques (en particulier la production de DRI et l'électrolyse du fer).

FORCES :

Augmentation de la compétitivité des industries françaises par l'accès à une électricité décarbonée et compétitive

FAIBLESSES :

- Durée des procédures de renforcement du réseau électrique (les délais de raccordement annoncés par RTE pouvant atteindre 10 ans dans certains cas)

PARTIES PRENANTES IDENTIFIÉES :

- Comité Stratégique de Filière « Mines et métallurgie »
- Ministère de l'économie et des finances (DGE)
- CRE
- RTE

PISTES D'ACTIONS :

- Encourager la conclusion de contrats d'approvisionnement de gré à gré en électricité. En effet, suite à la fin programmée du dispositif « ARENH » à l'horizon 2026, des réflexions sont en cours sur la mise en œuvre de contrats d'électricité de long terme dans le cadre de la réforme du marché de l'électricité, pour sécuriser l'accès à un prix de l'électricité compétitif, notamment dans le cadre de la mission d'expertise confiée à ce sujet à Philippe Darmayan et des discussions autour des contrats d'allocation de production nucléaire ([CAPN](#))
- Planifier et prioriser les demandes de raccordement par secteur et par zone industrielle. Pour faciliter l'accueil de nouvelles installations, la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables simplifie les procédures de planification et d'anticipation des raccordements des projets d'énergies renouvelables et des projets de décarbonation de l'industrie. Ainsi au sein de l'article 27, des dérogations procédurales sont accordées aux projets de décarbonation de l'industrie sous certaines conditions, tandis que l'article 28 organise la file d'attente pour le raccordement au réseau public de transport d'électricité. L'autorité compétente de l'État peut modifier l'ordre de classement des demandes de raccordement des projets de décarbonation au sein d'une zone géographique, selon des critères transparents et objectifs fixés par décret.
- Étudier une répartition décentralisée dans les territoires des nouvelles installations sidérurgiques (en particulier la production de DRI et l'électrolyse du fer qui peuvent s'imaginer sur des tailles d'installations beaucoup plus petites et donc réparties de manière plus diffuse sur le territoire, ceci afin de lisser les besoins locaux en renforcement de réseaux électriques).

POUR PLUS D'INFORMATIONS :

- Lien vers les articles 27 et 28 de la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables :

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047294244/>
- [https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/journalistes/tous-les-communiques-de-presse/gravity-signe-une-lettre-d'intention-avec-edf-pour-securiser-une-partie-de-lapprovisionnement-en-electricite-de-sa-future-usine-a-fos-sur-mer](https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/journalistes/tous-les-communiques-de-presse/gravity-signe-une-lettre-d-intention-avec-edf-pour-securiser-une-partie-de-lapprovisionnement-en-electricite-de-sa-future-usine-a-fos-sur-mer)

6.2. Amélioration du recyclage

6.2.1. Collecte et tri des déchets d'acier

5. OPTIMISER la collecte et le tri des déchets d'acier sur le territoire

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

La collecte des ferrailles en vue du recyclage, essentiellement dans la filière électrique et les fonderies, mais également, dans une faible mesure, dans la filière hauts fourneaux en complément de la valorisation des chutes de production, permet de baisser les émissions de CO₂ liées à la production d'acier. La filière électrique dépend fortement d'un approvisionnement suffisant en ferrailles pour sa production, et les nouveaux procédés de production d'acier décarboné, portés par la voie DRI-EAF, feront également appel à de la ferraille pour leur approvisionnement. On s'attend donc à avoir une demande croissante en ferrailles contenant peu d'impuretés dans les prochaines années, entraînant une tension sur le marché des ferrailles.

Il est donc essentiel de mobiliser dès à présent le gisement de déchets en amont en optimisant à la fois les filières de collecte au travers notamment des filières REP, mais également en augmentant la qualité du tri des déchets pour augmenter la valeur des déchets recyclés. En effet, la collecte, le tri des déchets et leur démantèlement permettent de réduire les coûts de mise à disposition de la matière aux acteurs industriels qui sont situés plus en aval de la chaîne de transformation des déchets et qui vont les transformer en nouvelles matières premières.

L'optimisation des filières de collecte et de tri peut passer par :

- Une meilleure structuration des filières de collecte (création de filières de collecte dédiées pour les produits non couverts par une filière dite à responsabilité élargie des producteurs),
- Un rehaussement des objectifs de collecte fixés dans le cahier des charges des éco-organismes des filières REP concernés (équipements électriques et électroniques, automobile, bâtiment, etc.)
- L'amélioration des technologies de tri pour une meilleure séparation entre métaux, et pour chaque métal par alliage, afin d'atteindre les standards de qualité exigés par l'industrie sidérurgique
- L'amélioration des technologies d'identification, de caractérisation et de traçabilité des matières post-collecte
- Le déploiement des dispositifs « écomodulation » dans les agréments et les objectifs des éco-organismes dans l'application des dispositions prévues par la loi AGEC
- Le développement de l'écoconception afin d'améliorer les opérations d'identification, de tri et de recyclage des matériaux à la fin de vie des produits
- L'organisation de travaux transverses plus réguliers (ex. entre les Comités Stratégiques de Filières « Mines et Métallurgies » et « Transformation et Valorisation des Déchets »), pour faciliter la communication entre les différentes instances existantes

FORCES :

- Création ou pérennisation d'emplois locaux dans les filières de collecte et de tri des déchets
- Ré évaluation des objectifs de collecte et de recyclage fixés dans les cahiers des charges des éco-organismes à chaque agrément
- Guichets de financement existants : France 2030, financement de projets par les éco-organismes, etc.
- Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (loi AGEC) : clauses ou « critères utiles » relatifs à l'économie circulaire

FAIBLESSES :

- Déploiement industriel long

PARTIES PRENANTES IDENTIFIÉES :

- Ministère de l'environnement et de la transition écologique (DGPNR),
- Ministère de l'économie et des finances (DGE)
- FEDEREC
- ADEME (DSREP / DEC)

PISTES D'ACTION :

- Soutenir la R&D des nouvelles technologies (en particulier sur les technologies plus perfectionnées de tri et de décontamination des ferrailles)
- Programme France 2030 sur le recyclage : nouvel appel à projet ADEME/BPI « Métaux critiques 2 »

<ul style="list-style-type: none"> • Task Force de la stratégie d'accélération pour le recyclage • Eco-organismes • CSF Transformation et Valorisation des Déchets • CSF Mines et métallurgie 	<ul style="list-style-type: none"> • L'AAP ORMAT pour le sur-tri uniquement (https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/20240115/fonds-economie-circulaire-ormat-2024-objectif-recyclage-matieres) • Déploiement des éco-modulations : pour inciter les entreprises à éco-concevoir les produits qu'ils mettent sur le marché (exemple : faciliter le démantèlement des produits pour en extraire plus facilement les différents matériaux), mise en place par les éco-organismes des éco-modulations prévues dans les agréments et révision régulière de ces éco-modulations pour les rendre incitatives.
---	---

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES :

- Présentation du mécanisme des Filières REP sur le site de l'ADEME
- France 2030 (anciennement Programme des Investissements d'Avenir)
- [Stratégie pour accélérer le recyclage et la transition vers une économie circulaire](#)
- [ADEME \(2024\), Bilan national du recyclage 2012 -2021](#)
- [ADEME \(2024\), Étude du potentiel de recyclage des métaux en France](#)



6.2.2. Limiter l'export de déchets d'acier

6. LIMITER l'export de déchets d'acier

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

Comme de nombreux biens de consommation, les ferrailles sont soumises à des échanges internationaux. Aujourd'hui, plus de la moitié des ferrailles françaises sont exportées du fait d'une trop faible qualité et du coût trop élevé du sur-tri et de la décontamination, tandis qu'une part des besoins est importée. Bien que des échanges commerciaux s'opèrent avec des pays extra UE comme la Turquie, ce marché est fortement régionalisé au sein de l'Union Européenne. En exportant ses ferrailles, essentiellement à destination de ses proches voisins (Belgique, Espagne, Italie), la France est un exportateur net.

Si ce taux d'exportation se maintenait (à défaut de mettre en place des mesures protectionnistes à l'export), la sidérurgie française devrait importer 3,6 fois plus de ferrailles dans *Par hydrogéné* (4,3 Mt en 2050), comparé à aujourd'hui, et 2 fois plus dans *Sobriété et diversification*. En revanche, dans *Compétitivité dégradée*, presque aucune importation ne serait nécessaire à partir de 2040.

Le Mécanisme d'AJustement Carbone aux frontières (MACF) est une régulation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par les produits importés en Europe. En limitant l'import de matière première en Europe, ce dispositif pourrait entraîner une restructuration du marché européen, augmentant l'utilisation des ferrailles à l'intérieur de l'UE.

Enfin la limitation répond à une logique de circuit court permettant de réduire les impacts liés au transport et contribue à sécuriser un approvisionnement en métal.

EFFETS SUR LA DECARBONATION :	FORCES :	FAIBLESSES :
La limitation de l'export permet potentiellement l'augmentation de l'incorporation de matériaux recyclé en Europe et de réduire l'import de matériaux primaires.	<ul style="list-style-type: none"> Levier de souveraineté nationale sur les matières Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (loi AGEC) : clauses ou « critères utiles » relatifs à l'économie circulaire Mécanisme d'AJustement Carbone aux frontières (MACF) 	<ul style="list-style-type: none"> Le marché des MPR (matières premières recyclées) est souvent orienté à l'export pour des raisons économiques, notamment pour des standards de MPR de basse qualité Faibles moyens d'observations et de suivi des flux de matières (différence entre données/codes douanes et qualité commerciales MPR)
PARTIES PRENANTES IDENTIFIEES :	PISTES D'ACTION :	
<ul style="list-style-type: none"> Ministère de l'environnement (DGPN) Ministère de l'économie et des finances (DGE) FEDEREC Task Force de la stratégie d'accélération pour le recyclage CSF Transformation et Valorisation des Déchets CSF Mines et métallurgie ADEME (DEC / DSREP) 	<ul style="list-style-type: none"> Imposer une mention dans les cahiers des charges des éco-organismes sur le respect de la proximité des lieux de traitement des déchets par rapport à leur lieu de production Mise en place d'un suivi administratif consistant à déclarer les exports pour inciter à maintenir l'approvisionnement en déchets (en quantité et en qualité) pour les industriels français Limiter l'exportation de déchets d'acier par la mise en place de réglementations dédiées, à l'échelle européenne Etudier la faisabilité d'une limitation de l'exportation de déchets d'acier à l'échelle nationale et/ou européenne. A titre d'exemple, l'Italie a classé au début de l'année 2022 les ferrailles dans la catégorie des matières premières critiques. En conséquence, les exportations de ces déchets doivent désormais être notifiées auprès des autorités nationales compétentes, qui en retour peuvent interdire l'opération en fonction des demandes sur le marché domestique. Étude ADEME sur correspondances entre données douanes/qualités commerciales MPR/qualité MPR référencées 	
INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES :		
<ul style="list-style-type: none"> Présentation du mécanisme des Filières REP sur le site de l'ADEME ADEME (2024) Étude du potentiel de recyclage des métaux en France ADEME (2024), Bilan national du recyclage 2012 -2021 		

6.2.3. Soutien à l'innovation - procédés de recyclage

7. SOUTENIR l'innovation dans les procédés de recyclage

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

L'atteinte de l'objectif -81% fixé dans la Stratégie Nationale Bas Carbone pour l'industrie est atteint en ayant recours plus massivement au recyclage des déchets d'acier. En effet, le recyclage doit rester une priorité pour réduire la pression sur les ressources naturelles et renforcer la résilience de la France et sa souveraineté industrielle. Le déploiement d'innovation permettant d'améliorer et d'optimiser les technologies de tri s'avère donc indispensable.

L'objectif est de faire émerger des solutions techniques non matures aujourd'hui jusqu'au stade de l'industrialisation en mobilisant des guichets de financement dédiés à l'innovation dans l'industrie (financement de démonstrateurs). Il s'agit également d'optimiser des technologies déjà existantes afin de permettre d'améliorer la qualité du tri et de décontamination des déchets d'acier.

EFFETS SUR LA DECARBONATION :

Les effets de cette action sembleraient se faire ressentir plutôt à moyen et long terme lorsque les technologies auront franchi le stade de projet pilote.

Quelques exemples de potentiel de décarbonation de technologies non matures

FORCES :

- Potentiel débouché sur des brevets et des exportations de la technologie
- Guichets de financement existants : France 2030, fond économie circulaire de l'ADEME, Innovation Fund au niveau européen.
- Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (loi AGEC) : clauses ou « critères utiles » relatifs à l'économie circulaire

FAIBLESSES :

- Manque de lisibilité des industriels sur les différents guichets de financement
- Faible diffusion des technologies de pointe de tri

PARTIES PRENANTES IDENTIFIEES :

- Agence Nationale de la Recherche (ANR)
- Banque Publique d'Investissements (BPI)
- Secrétariat Général Pour l'Investissement (SGPI)
- *Task Force* de la stratégie d'accélération pour le recyclage
- ADEME (Direction Economie circulaire, Directions Régionales)

PISTES D'ACTION :

- Programme France 2030 sur le Recyclage : Nouvel appel à projets ADEME/BPI « métaux critiques 2 » avec un nouveau volet « R&D/innovation »
- Financement de thèses : [appel à candidature thèse](#)

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES :

- En France : France 2030 (anciennement Programme des Investissements d'Avenir)
- En Union Européenne : [Innovation Fund](#)
- ADEME (2024), Bilan national du recyclage 2012 -2021
- ADEME (2024) Étude du potentiel de recyclage des métaux en France



6.3. Anticiper les niveaux de demande de demain

6.3.1. Relocalisation de la chaîne de valeur aval de l'acier

4. RELOCALISER la chaîne de valeur aval de l'acier

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

Une baisse non anticipée de la demande est susceptible d'entraîner des difficultés économiques pour les sidérurgistes français, qui se retrouveraient en situation de surcapacité, et d'alimenter un contexte d'incertitudes peu propice aux investissements nécessaires à la décarbonation. Il semble donc primordial de planifier les politiques de sobriété afin d'apporter de la visibilité sur les besoins futurs de la France en acier, notamment pour le bâtiment et les infrastructures. A titre d'exemple, la planification écologique établit par le Secrétariat Général à la Planification Ecologique (SGPE) permet de fixer les grandes tendances d'évolution des différents secteurs (bâtiment, transport, énergie) permettant ainsi aux acteurs de la profession d'anticiper les évolutions structurantes des segments de marché qu'ils adressent.

En outre, la conjonction de mesures de sobriété à une politique de relocalisation des produits stratégiques importés, tels que les équipements liés aux énergies renouvelables, permettrait de gagner en souveraineté, de créer des emplois et d'impulser de nouvelles dynamiques territoriales sans intensifier les pressions exercées par les filières de production d'acier décarboné sur les consommations de matière et d'énergie.

Il semble donc nécessaire de mettre en œuvre des mesures qui facilitent l'implantation et le maintien d'activités industrielles stratégiques sur le territoire national favorisant l'utilisation d'acier bas carbone issu de la production nationale. La loi n° 2023-973 du 23 octobre 2023 relative à l'industrie verte vise à accélérer la réindustrialisation du pays et à faire de la France le leader de l'industrie verte en Europe. Certaines mesures de cette loi sont susceptibles de faciliter la relocalisation de la chaîne de valeur de l'acier, notamment :

- Diviser par deux les délais d'implantation industrielle,
- La création d'une procédure exceptionnelle simplifiée pour les projets d'intérêt national majeur,
- Une commande publique qui favorise davantage les produits vertueux sur le plan environnemental dès 2026.

PARTIES PRENANTES IDENTIFIÉES :

- Ministère de l'économie et des finances (DGE)
- Secrétariat Général à la Planification Ecologique (SGPE)

PISTES D'ACTIONS :

Mettre en place des dispositifs de soutien à la relocalisation de la chaîne de valeur aval de l'acier, typiquement la production de panneaux solaires photovoltaïques en France. Lors de la publication de la loi Industrie Verte a notamment été mis en œuvre le C3IV, crédit d'impôt en faveur de l'industrie verte, visant à favoriser l'implantation de nouvelles usines de productions de batteries, éoliennes, panneaux solaires et pompes à chaleur (ou de leurs composants, liste à consulter sur le site dédié).

- Actionner le levier de la commande public pour stimuler l'émergence de l'acier bas carbone en France

POUR PLUS D'INFORMATIONS :

- [Loi n° 2023-973 du 23 octobre 2023 relative à l'industrie verte](#)
- Planification écologique : [un plan d'action pour accélérer la transition écologique](#)
- C3IV : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/credit-impot-industrie-verte-C3IV-agreement>

6.3.2. Favoriser l'intégration d'acier dit « bas carbone » dans les produits finaux

8. FAVORISER l'intégration d'acier dit « bas carbone » dans les produits finaux

CONTEXTE et DESCRIPTIF DE L'ACTION :

L'intégration d'acier dit « bas carbone » dans les produits finaux est un enjeu important car il permet d'économiser des ressources non renouvelables, de limiter les émissions, notamment de GES et de relocaliser autant que possible l'approvisionnement à l'échelle nationale.

Les enjeux sont les suivants :

- Produire plus d'acier bas carbone à partir de ferrailles sur le territoire national, et en évitant l'export de déchets et la dépendance à des filières de valorisation étrangères
- Mobiliser mieux et rendre plus compétitifs les aciers dits « bas carbone » en substitution de l'acier carboné
- Mettre en œuvre des capacités industrielles sur toute la chaîne, pour favoriser l'équilibre de l'offre et de la demande en ferraille
- Mieux orienter les différents flux d'acier bas carbone (issu de la filière électrique ou DRI-EAF), suivant leur standard de qualité, vers les industriels susceptibles de les utiliser
- Inciter les fabricants de produits finaux à intégrer davantage d'acier bas carbone
- Définir une méthode et des outils de traçabilité de l'incorporation d'acier bas carbone dans les produits finaux

EFFETS SUR LA DECARBONATION :	FORCES :	FAIBLESSES :
Toute substitution d'acier carboné par des acier bas carbone permet à la fois un gain en émissions de CO ₂ et en matières premières vierges extraites	<ul style="list-style-type: none"> • Fixation d'objectifs favorisant l'éco conception pour les produits contenant de l'acier couverts par une filière dite à Responsabilité Élargie des Producteurs • Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (loi AGEC) : clauses ou « critères utiles » relatifs à l'économie circulaire • Dans le cadre du Plan National Achats Durables, d'ici 2025, 100 % des contrats de la commande publique notifiés au cours de l'année comprennent au moins une considération environnementale (dont l'incorporation de MPR). 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque d'harmonisation des différentes qualités et standard de ferraille • Manque de traçabilité permettant de distinguer la provenance des ferrailles
PARTIES PRENANTES IDENTIFIEES :	PISTES D'ACTION :	
<ul style="list-style-type: none"> • Ministère de l'environnement (DGPNR) • Ministère de l'économie et des finances (DGE) • Eco-organismes • ADEME (Direction Economie Circulaire, DSREP, Directions Régionales) • Task Force de la stratégie d'accélération pour le recyclage • Fédérations professionnelles et industrielles (produits finaux) - 	<ul style="list-style-type: none"> • Inciter à augmenter l'incorporation d'acier bas carbone dans les nouveaux produits au travers des filières REP comprenant des produits en acier via une modulation de l'éco-contribution des metteurs sur le marché en fonction du niveau de réincorporation (ou un malus pour ceux qui n'en incorporent pas du tout) • Mettre en place une plateforme numérique d'identification des matières premières de recyclage métalliques. Par exemple, en développant la plateforme numérique Mjunction (marketplace), le groupe indien Tata Steel a amélioré l'efficacité des flux et l'utilisation des matières d'acheteurs et de vendeurs de ferrailles, de déchets et d'actifs non utilisés. • Mettre en place des mesures réglementaires sur l'incorporation d'aciers dits « bas carbone » dans les marchés publics • Financement de projets et d'étude de faisabilité (fond Economie circulaire de l'ADEME) • Fond Economie circulaire – ORMAT (Objectif Recyclage MATières) : l'appel à projets du Fond Economie Circulaire de l'ADEME soutient financièrement la production de matières premières de recyclage (MPR) et leur incorporation dans leurs produits par les transformateurs et metteur en marchés 	

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES :

- Présentation du mécanisme des Filières REP sur le site de l'ADEME
- En France : France 2030 (anciennement Programme des Investissements d'Avenir)
- [Stratégie pour accélérer le recyclage et la transition vers une économie circulaire](#)
- ADEME (2024) [Étude du potentiel de recyclage des métaux en France](#)
- ADEME (2024), [Bilan national du recyclage 2012 -2021](#)



Références bibliographiques

- [1] « Iron and Steel Technology Roadmap - Towards more sustainable steelmaking », IEA, Paris, 2020.
- [2] INERIS, « Base de données GEREPI (Gestion Electronique du Registre des Emissions Polluantes) ».
- [3] P. Braun, « L'aciérie de Gandrange plombe toujours le paysage », Les Echos. Consulté le: 11 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/2018/06/lacierie-de-gandrange-plombe-toujours-le-paysage-991752>
- [4] C. Folny, « Thionville. Ex-usine Akers : 7 M€ investis, la reconversion à mi-chemin », Le Républicain Lorrain. Consulté le: 11 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2021/03/13/ex-usine-akers-7-m-investis-la-reconversion-a-mi-chemin>
- [5] Valérie Létard (rapporteur, sénatrice), « Mission d'information sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXIe siècle : opportunité de croissance et de développement. Tome 1: Rapport. », 649, juill. 2019. Consulté le: 28 avril 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r18-649-1/r18-649-11.pdf>
- [6] « Iron Ore Statistics and Information | U.S. Geological Survey », USGS. Consulté le: 20 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information>
- [7] S. Sourisseau, « The Global Iron and Steel Industry: From a Bilateral Oligopoly to a Thwarted Monopsony », *The Australian Economic Review*, p. 232-243, 2018.
- [8] « Cours sur les aciers. », Rocd@cier. Consulté le: 30 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rocdacier.com/cours-sur-les-aciers/>
- [9] Industrie-techno, « Les aciers spéciaux repoussent leurs limites », déc. 2012, Consulté le: 25 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.industrie-techno.com/article/les-aciers-speciaux-repoussent-leurs-limites.22489>
- [10] « L'influence des alliages | Fabory ». Consulté le: 14 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fabory.com/fr/knowledge_center/technical/steel/influence_of_alloying_elements
- [11] « Types d'Alliages Métalliques », Qualifab. Consulté le: 30 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://qualifab.ca/fr/types-d-alliages-metalliques/>
- [12] « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions », IEA, 2021.
- [13] Fédération Forge Fonderie, « La forge et la fonderie : panorama économique de nos métiers et marchés ». Consulté le: 5 mai 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.forgefonderie.org/fr/forge-fonderie/panorama-economique>
- [14] R. Gyllenram et W. Wei, *304 Stainless steel Carbon Footprint Comparision-EU, Indonesia and China*. 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.22369.79206.
- [15] « Preserving value in EU industrial materials - A value perspective on the use of steel, plastics and aluminium », Material Economics, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://materialeconomics.com/publications/preserving-value-eu>
- [16] S. Dworak et J. Fellner, « Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 173, p. 105692, oct. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105692.
- [17] S. Manocha et F. Ponchon, « Management of Lime in Steel », *Metals*, vol. 8, p. 686, août 2018, doi: 10.3390/met8090686.
- [18] S. Nicholas et S. Basirat, « Solving Iron Ore Quality Issues for Low-Carbon Steel », *Institute for Energy Economics and Financial Analysis*, 9 août 2022.
- [19] « Les laitiers sidérurgiques | CTPL ». Consulté le: 30 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/>
- [20] P. ROSSI, L. GAVOIS, et G. RAOUL, « Laitiers de haut-fourneau Origine, production et caractéristiques », *Techniques de l'ingénieur Valorisation des sous-produits industriels en génie civil*, vol. base documentaire : TIB826., n° ref. article : c5379. Editions T.I., 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/valorisation-des-sous-produits-industriels-en-genie-civil-42826210/laitiers-de-haut-fourneau-c5379/>
- [21] S. Roudier, L. Sancho, R. Remus, et M. Aguado-Monsonet, « Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control », 2012.
- [22] R. Wang, L. Jiang, Y. Wang, et A. P. Roskilly, « Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, p. 122997, juill. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122997.
- [23] J.-C. Sant, « ArcelorMittal Méditerranée - Les co-produits à Fos », 19 mai 2011. [En ligne]. Disponible sur: <https://slideplayer.fr/slide/14090810/>
- [24] K. Afanga, « Modélisation systémique des filières sidérurgiques en vue de leur optimisation énergétique et environnementale », p. 152.
- [25] S. Moraes, J. Lima, et T. Ribeiro, « Iron Ore Pelletizing Process: An Overview », 2018. doi: 10.5772/intechopen.73164.
- [26] J. Mourao, I. Cameron, M. Huerta, N. Patel, et R. Pereira, « COMPARISON OF SINTER AND PELLET USAGE IN AN INTEGRATED STEEL PLANT 1 », mai 2020.
- [27] J.-M. Steiler, « Haut fourneau - Bases théoriques », *Techniques de l'Ingénieur*, n° M7400 V2, p. 31, mars 2017.

- [28] J. ASTIER, « Agglomération des minerais de fer », *Techniques de l'ingénieur Métaux ferreux : élaboration du métal primaire*, vol. base documentaire : TIB366DUO., n° ref. article : m7320. Editions T.I., 2007. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-ferreux-elaboration-du-metall-primaire-42366210/agglomeration-des-mineraux-de-fer-m7320/>
- [29] G. Durvaux, « Du minerai à l'acier, histoire d'un processus de fabrication », p. 9.
- [30] D. Isler, « Coke métallurgique - Propriétés et conséquences pour le haut-fourneau », p. 18, 2016.
- [31] A. Keys, M. van Hout, et B. Daniëls, « Decarbonisation options for the Dutch steel industry », PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 3723, 2019.
- [32] D. Isler, « Coke métallurgique - Fabrication pour le haut-fourneau », p. 24, 2016.
- [33] J.-M. STEILER, « Haut-fourneau Qualité des matières premières et de la fonte », n° ref. article : m7403. Editions T.I., 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-ferreux-elaboration-du-metall-primaire-42366210/haut-fourneau-m7403/>
- [34] M. Burteaux, « Haut fourneau - Conception et technologie », p. 18, 1992.
- [35] P. Dhelft, « Réchauffeurs d'air - Appareils cowpers », p. 10, 1994.
- [36] J.-M. Steiler, « Haut fourneau - Principes de fonctionnement », p. 34, 2018.
- [37] C. De Maré, « Why Both Hydrogen and Carbon are Key for Net Zero Steelmaking », in *AISTech 2021 Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, AIST, juin 2021, p. 1952-1974. doi: 10.33313/382/199.
- [38] A. M. Carpenter, « Injection of coal and waste plastics in blast furnaces », p. 58, 2010.
- [39] É. Larousse, « Coupe d'un haut-fourneau – Média LAROUSSE ». Consulté le: 5 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/encyclopédie/images/Coupe_dun_haut-fourneau/1003262
- [40] « What Is Slag | PDF | Steelmaking | Refractory », Scribd. Consulté le: 20 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/73761802/What-is-Slag>
- [41] G. Denier, « Aciéries de conversion - Aspects opérationnels, équipements et ingénierie », p. 30, 2010.
- [42] G. Denier, « Aciéries de conversion - Contexte et aspects théoriques », p. 24, 2018.
- [43] G. Chen et S. He, « Numerical simulation of Argon–Molten steel two-phase flow in an industrial single snorkel refining furnace with bubble expansion, coalescence, and breakup », *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, janv. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.01.026.
- [44] M. Olette, C. Gatellier, et G. Lamarque, « Métallurgie secondaire : outils et procédés », p. 21, 2009.
- [45] M. Olette, C. Gatellier, G. Lamarque, et F. Ruby-Meyer, « Métallurgie secondaire », p. 25, 2008.
- [46] K. Linnestad, S. Ollila, S. O. Wasbø, A. Bogdanoff, et T. Rotevatn, « Adaptive First Principles Model for the CAS-OB Process for Real-Time Applications », *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, vol. 11, sept. 2021, doi: 10.3390/met11101554.
- [47] H. Wang *et al.*, « Mathematical Simulation on Blast Furnace Operation of Coke Oven Gas Injection in Combination with Top Gas Recycling », *steel research int.*, vol. 87, n° 5, p. 539-549, mai 2016, doi: 10.1002/srin.201500372.
- [48] B. Bieda, K. Grzesik, D. Sala, et B. Gawęć, « Life cycle inventory processes of the integrated steel plant (ISP) in Krakow, Poland—coke production, a case study », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, n° 8, p. 1089-1101, août 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0904-9.
- [49] S. Garcia, V. Montequín, H. Morán Palacios, et A. Bayo, « A Mixed Integer Linear Programming Model for the Optimization of Steel Waste Gases in Cogeneration: A Combined Coke Oven and Converter Gas Case Study », *Energies*, vol. 13, p. 3781, juill. 2020, doi: 10.3390/en13153781.
- [50] P. Hellberg, L. Jonsson, et P. J. Sheng, *A Model of Gas Injection into a Blast Furnace Tuyere*. 2005.
- [51] A.-M. Iosif, « Modélisation physico-chimique de la filière classique de production d'acier pour l'analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie », Université de Lorraine, 2006. [En ligne]. Disponible sur: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL_2006_IOSIF_A.pdf
- [52] J. Song, Z. Jiang, C. Bao, et A. Xu, « Comparison of Energy Consumption and CO₂ Emission for Three Steel Production Routes—Integrated Steel Plant Equipped with Blast Furnace, Oxygen Blast Furnace or COREX », *Metals*, vol. 9, n° 3, p. 364, mars 2019, doi: 10.3390/met9030364.
- [53] H. He, H. Guan, X. Zhu, et H. Lee, « Assessment on the energy flow and carbon emissions of integrated steelmaking plants », *Energy Reports*, vol. 3, p. 29-36, nov. 2017, doi: 10.1016/j.egyr.2017.01.001.
- [54] E. Ubieto, « Energy System Analysis in the Swedish Iron and Steel Industry », 2012, [En ligne]. Disponible sur: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-42147>
- [55] M. McBrien, A. C. Serrenho, et J. M. Allwood, « Potential for energy savings by heat recovery in an integrated steel supply chain », *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, p. 592-606, juin 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.099.
- [56] P. Jin, Z. Jiang, C. Bao, S. Hao, et X. Zhang, « The energy consumption and carbon emission of the integrated steel mill with oxygen blast furnace », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 117, p. 58-65, févr. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.008.
- [57] « Iron and Steel CCS Study (Techno-Economics Integrated Steel Mill) », IEAGHG, juill. 2013.
- [58] IEAGHG, « Iron and Steel CCS Study (Techno-Economics Integrated Steel Mill) », juill. 2013.
- [59] C. Wang, M. Brämming, et M. Larsson, « Numerical Model of Scrap Blending in BOF with Simultaneous Consideration of Steel Quality, Production Cost, and Energy Use », *steel research international*, vol. 84, n° 4, p. 387-394, avr. 2013, doi: 10.1002/srin.201200185.
- [60] « Notre responsabilité ». Consulté le: 25 août 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://france.arcelormittal.com/developpement-durable.aspx>

- [61] « World Steel Recycling in figures 2015 - 2019 », Bureau of International Recycling, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bir.org/publications/facts-figures/download/643/175/36?method=view>
- [62] « Dernière ligne droite pour le four poche, étape essentielle de la décarbonation », ArcelorMittal en France. Consulté le: 29 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://france.arcelormittal.com/actualites/derniere-ligne-droite-pour-le-four-poche-etape-essentielle-de-la-decarbonation>
- [63] ArcelorMittal, « Développer le recyclage d'acier pour réduire le CO₂ ». [En ligne]. Disponible sur: <https://france.arcelormittal.com/neutralite-carbone/recyclage>
- [64] Catherine Moncel, « ArcelorMittal Dunkerque investit pour l'environnement », L'écho circulaire. Consulté le: 21 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lecho-circulaire.com/recyclage-et-reseaux-de-chaleur-chez-arcelormittal-dunkerque/>
- [65] Julie Kiavué, « Photoreportage : Dans les coulisses d'ArcelorMittal Dunkerque », Eco121. Consulté le: 21 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.eco121.fr/photoreportage-arcelormittal/>
- [66] Ouest France, « ArcelorMittal à Fos, futur centre de démantèlement de navires ? » Consulté le: 21 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lemarin.ouest-france.fr/shipping/arcelormittal-a-fos-futur-centre-de-demantlement-de-navires-f0c87c9c-9879-4556-9be9-a4f878f3541a>
- [67] La Provence, « Fos-sur-Mer : ArcelorMittal Méditerranée se lance dans l'acier vert ». Consulté le: 21 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.laprovence.com/actu/en-direct/6169087/fos-sur-mer-arcelormittal-mediterranee-se-lance-dans-lacier-vert.html>
- [68] B. Voraberger, G. Wimmer, U. Dieguez Salgado, E. Wimmer, K. Pastucha, et A. Fleischanderl, « Green LD (BOF) Steelmaking—Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate », *Metals*, vol. 12, n° 3, 2022, doi: 10.3390/met12030466.
- [69] G. Brooks, N. Madhavan, A. Overbosch, M. A. Rhamdhani, et B. Rout, *Potential for Increased Scrap Melting in a BOF*. 2022, p. 449. doi: 10.33313/386/050.
- [70] T. Bradaric, Z. Slovic, et K. Raic, « Recent experiences with improving steel-to-hot-metal ratio in BOF steelmaking », *Metallurgical & Materials Engineering*, vol. 22, juill. 2016, doi: 10.30544/218.
- [71] C. Yilmaz, J. Wendelstorf, et T. Turek, « Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions », *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, p. 488-501, juin 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.162.
- [72] J.-P. Birat, « Society, Materials, and The Environment: The Case of Steel », *Metals*, vol. 10, p. 331, mars 2020, doi: 10.3390/met10030331.
- [73] A. Babich et D. Senk, « 13 - Coke in the iron and steel industry », in *New Trends in Coal Conversion*, I. Suárez-Ruiz, M. A. Diez, et F. Rubiera, Éd., Woodhead Publishing, 2019, p. 367-404. doi: 10.1016/B978-0-08-102201-6.00013-3.
- [74] M. Jampani, « Increased Use of Natural Gas in Blast Furnace Iron-making », Carnegie Mellon University, Pittsburg, PA, 2016.
- [75] M. De Santis *et al.*, « GreenSteel D2.2 Investments Needs », GreenSteel for Europe Consortium, mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/GreenSteel-D2.2-Investment-Needs-Publishable-version.pdf>
- [76] N. Müller, G. Herz, E. Reichelt, M. Jahn, et A. Michaelis, « Assessment of fossil-free steelmaking based on direct reduction applying high-temperature electrolysis », *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100158, oct. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100158.
- [77] « "Green steel" initiative: cutting carbon with H₂Syngas ». Consulté le: 19 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.saarstahl.com/sag/en/group/media/press/green-steel-initiative-cutting-carbon-with-h2syngas-97804.shtml>
- [78] « Tata Steel commences trial use of hydrogen gas in blast furnace at Jamshedpur plant », *The Economic Times*, 24 avril 2023. Consulté le: 25 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://economictimes.indiatimes.com/industry/ind-goods/svs/steel/indiastata-steel-begins-hydrogen-gas-injection-trial-in-blast-furnace/articleshow/99723512.cms>
- [79] V. Shatokha, « Modeling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions », *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 29, n° 10, p. 1851-1861, 2022, doi: 10.1007/s12613-022-2474-8.
- [80] « Coke Oven Gas Injection in a Blast Furnace – IspatGuru ». Consulté le: 1 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ispatguru.com/coke-oven-gas-injection-in-a-blast-furnace/>
- [81] « ArcelorMittal Asturias starts coke-oven gas injection for Blast Furnace B | ArcelorMittal ». Consulté le: 1 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-asturias-starts-coke-oven-gas-injection-for-blast-furnace-b/>
- [82] name, « COKE OVEN GAS INJECTION AT ROGEZA BLAST FURNACE STARTED ON TIME ». Consulté le: 1 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.paulwurth.com/en/coke-oven-gas-injection-at-rogesa-blast-furnace-started-on-time/>
- [83] Danloy, G. *et al.*, « ULCOS - Pilot testing of the Low-CO₂ Blast Furnace process at the experimental BF in Luleå », *Rev. Met. Paris*, vol. 106, n° 1, p. 1-8, 2009, doi: 10.1051/metal/2009008.
- [84] M. Chu et J.-I. Yagi, « Numerical Evaluation of Blast Furnace Performance under Top Gas Recycling and Lower Temperature Operation », *steel research international*, vol. 81, n° 12, p. 1043-1050, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201000103>.
- [85] J. Hakala, P. Kangas, K. Penttilä, M. Alarotu, M. Björnström, et P. Koukkari, *Replacing Coal used in Steelmaking with Biocarbon from Forest Industry Side Streams*. FI: VTT Technical Research Centre of Finland, 2019. Consulté le: 2 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2019.T351>

- [86] « Renewable energy options for industrial process heat », Australian Renewable Energy Agency (ARENA), nov. 2019.
- [87] J. Hakala, I. Hannula, et P. Koukkari, « Prospects for the use of biomass in steel industry », présenté à IEA Bioenergy ExCo86 workshop, 20 octobre 2020.
- [88] E. Mousa, C. Wang, J. Riesbeck, et M. Larsson, « Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, p. 1247-1266, nov. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.061.
- [89] « Torero: Replacing coal with sustainable, circular carbon in our steelmaking processes | ArcelorMittal ». Consulté le: 4 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/decarbonisation-technologies/torero-replacing-coal-with-sustainable-circular-carbon-in-our-steelmaking-processes/>
- [90] « Cost of CO₂ Capture in the Industrial Sector: Cement and Iron and Steel Industries », IEAGHG, sept. 2018.
- [91] N. Jiang *et al.*, « CO₂ capture from dry flue gas by means of VPSA, TSA and TVSA », *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 35, p. 153-168, janv. 2020, doi: 10.1016/j.jcou.2019.09.012.
- [92] M. Abdul Quader, S. Ahmed, S. Z. Dawal, et Y. Nukman, « Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, p. 537-549, mars 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.101.
- [93] G. Rodrigues, M. Raventos, R. Dubettier, et S. Ruban, « Adsorption Assisted Cryogenic Carbon Capture: an Alternate Path to Steam Driven Technologies to Decrease Cost and Carbon Footprint », *SSRN Electronic Journal*, janv. 2021, doi: 10.2139/ssrn.3820744.
- [94] B. Lee et I. Sohn, « Review of Innovative Energy Savings Technology for the Electric Arc Furnace », *JOM*, vol. 66, n° 9, p. 1581-1594, sept. 2014, doi: 10.1007/s11837-014-1092-y.
- [95] T. Hay, V.-V. Visuri, M. Aula, et T. Echterhof, « A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process », *steel research international*, vol. 92, n° 3, p. 2000395, 2021, doi: 10.1002/srin.202000395.
- [96] L. Yang, T. Jiang, G. Li, et Y. Guo, « Discussion of Carbon Emissions for Charging Hot Metal in EAF Steelmaking Process », *High Temperature Materials and Processes*, vol. 36, n° 6, p. 615-621, 2017, doi: doi:10.1515/htmp-2015-0292.
- [97] P. Ayed, C. Ouvradou, et J. Astier, « Aciérie électrique », *Techniques de l'ingénieur*, p. 29, 2005.
- [98] T. Echterhof, « Review on the Use of Alternative Carbon Sources in EAF Steelmaking », *Metals*, vol. 11, n° 2, 2021, doi: 10.3390/met11020222.
- [99] T. Demus, T. Echterhof, H. Pfeifer, M. Schulten, et P. Quicker, *INVESTIGATIONS ON THE USE OF BIOGENIC RESIDUES AS A SUBSTITUTE FOR FOSSIL COAL IN THE EAF STEELMAKING PROCESS*. 2012.
- [100] J. Madias, « Electric Furnace Steelmaking », in *Treatise on Process Metallurgy*, vol. 3, 2014, p. 271-300. doi: 10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4.
- [101] P.-J. Cunat, « Affinage des aciers inoxydables », p. 10, 2008.
- [102] « Improve the EAF scrap route for a sustainable value chain in the EU Circular Economy scenario », ESTEP, Brussels, Belgium, juin 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/Improve-the-EAF-scrap-route-Roadmap-Final-V2-3.pdf>
- [103] « ABB Review 3-2015_72dpi.pdf ». Consulté le: 3 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://library.e.abb.com/public/137a496c74504703b22ef3904825c1ac/ABB%20Review%203-2015_72dpi.pdf
- [104] A. Dicion, « Innovative Energy Conservation Through Scrap Pre-heating in an Electric Arc Furnace », 2013.
- [105] N. Pardo, J. A. Moya, et K. Vatopoulos, « Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry », Joint Research Center, 2012.
- [106] « Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry », United States Environmental Protection Agency, sept. 2012.
- [107] L. Yang, T. Jiang, G. Li, Y. Guo, et F. Chen, « Present Situation and Prospect of EAF Gas Waste Heat Utilization Technology », *High Temperature Materials and Processes*, vol. 37, n° 4, p. 357-363, avr. 2018, doi: 10.1515/htmp-2016-0218.
- [108] « Scrap preheating for iron and steel | Climate Technology Centre & Network ». Consulté le: 10 octobre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ctc-n.org/technologies/scrap-preheating-iron-and-steel>
- [109] E. Ahmad, « Slag and refractory compatibility in the CONSTEEL EAF », 123, 2016, Consulté le: 3 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2615749>
- [110] « New Consteel® EAF for Tenaris in Argentina | Tenova ». Consulté le: 5 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://tenova.com/newsroom/latest-tenova/new-consteelr-eaf-tenaris-argentina>
- [111] E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, E. Blomen, et E. Masanet, « Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the US iron and steel industry an ENERGY STAR (R) guide for energy and plant managers », Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2010.
- [112] D. Brough et H. Jouhara, « The Aluminium Industry: A Review on State-of-the-Art Technologies, Environmental Impacts and Possibilities for Waste Heat Recovery », vol. 1-2, janv. 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2019.100007.
- [113] N. Richard, « Combustion sans flamme et brûleurs hautes performances | Archives | Traitements&Matériaux.fr », Traitements & Matériaux. Consulté le: 11 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://traitementsetmateriaux.fr/lmprimer/fiche/?id=700&from=actualites&type=archive>
- [114] J. Schelle, « Oxyfuel Combustion in the Steel Industry: Energy Efficiency and Decrease of CO₂ Emissions », 2010. doi: 10.5772/9830.
- [115] J. Woodburn, « Oxy-Fuel Burners Can Reduce Steel Furnace Energy Use By Up To 45% », p. 2.

- [116] S. Aduloju, W. Ebhota, B. Gabriel Oladeji, et O. Biodun, « Process Modeling of Steel refining in Electric Arc Furnace (EAF) for Optimum Performance and Waste Reduction », *Chemical and Process Engineering Research*, vol. 28, p. 66-77, nov. 2014.
- [117] R. Berger, A. Kopp, et H. Philipson, « A feasibility to electrify the combustion heated walking beam furnace : Applying induction and resistance heating », 2018.
- [118] H. Pfeifer, « Industrial Furnaces - Status and Research Challenges », *Energy Procedia*, vol. 120, p. 28-40, août 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.153.
- [119] « Hydrogen fuel can help steel industry reduce emissions », Linde (former AGA) Industrial Gases. Consulté le: 3 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.linde-gas.se/en/news_ren/linde_stories/hydrogen-fuel-can-help-steel-industry-reduce-emissions.html
- [120] « First in the world to heat steel using hydrogen - Ovako ». Consulté le: 3 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ovako.com/en/newsevents/stories/first-in-the-world-to-heat-steel-using-hydrogen/>
- [121] D. E. Wiley, M. T. Ho, et A. Bustamante, « Assessment of opportunities for CO₂ capture at iron and steel mills: An Australian perspective », *Energy Procedia*, vol. 4, p. 2654-2661, janv. 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.165.
- [122] K. Dong, W. Liu, et R. Zhu, « Study on Indirect Measuring Technology of EAF Steelmaking Decarburization Rate by Off-gas Analysis Technique in Hot State Experiment », *High Temperature Materials and Processes*, vol. 34, p. 539-547, oct. 2015, doi: 10.1515/htmp-2014-0076.
- [123] S. Kombathula, « Sequestration of carbon dioxide in steel slag », KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1466343/FULLTEXT01.pdf>
- [124] M. H. El-Naas, M. El Gamal, S. Hameedi, et A.-M. O. Mohamed, « CO₂ sequestration using accelerated gas-solid carbonation of pre-treated EAF steel-making bag house dust », *Journal of Environmental Management*, vol. 156, p. 218-224, juin 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.03.040.
- [125] M. Marcos *et al.*, *Biochar for a sustainable EAF steel production (GREENEAF2)*. 2019. doi: 10.2777/708674.
- [126] J. Rieger *et al.*, « Residue Valorization in the Iron and Steel Industries: Sustainable Solutions for a Cleaner and More Competitive Future Europe », *Metals*, vol. 11, n° 8, 2021, doi: 10.3390/met11081202.
- [127] S. Devasahayam, G. Bhaskar Raju, et C. Mustansar Hussain, « Utilization and recycling of end of life plastics for sustainable and clean industrial processes including the iron and steel industry », *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 2, n° 3, p. 634-646, déc. 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.08.002.
- [128] F. Cirilli, D. Mirabile, L. Bianco, M. Chini, et D. Gaspardo, « Fossil coal substitution by plastic injection in EAF steel production », présenté à convegno nazionale AIM, Italy, sept. 2022, p. 9. doi: 10.5281/zenodo.7594942.
- [129] « Home | OnlyPlastic ». Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.onlyplastic.eu/index.html>
- [130] J. Astier, « Réduction directe », p. 26, 2005.
- [131] A. Bhaskar, M. Assadi, et H. Nikpey Somehsaraei, « Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen », *Energies*, vol. 13, n° 3, 2020, doi: 10.3390/en13030758.
- [132] F. Memoli, J. Jones, et F. Picciolo, « The use of DRI in a consteel® EAF process », *Iron and Steel Technology*, vol. 12, p. 72-80, févr. 2015.
- [133] P. Cavaliere, A. Perrone, A. Silvello, P. Stagnoli, et P. Duarte, « Integration of Open Slag Bath Furnace with Direct Reduction Reactors for New-Generation Steelmaking », *Metals*, vol. 12, n° 2, 2022, doi: 10.3390/met12020203.
- [134] K. Rechberger, A. Spanlang, A. S. Conde, H. Wolfmeir, et C. Harris, « Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking », *steel research international*, vol. 91, n° 11, p. 2000110, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>.
- [135] F. Patisson et O. Mirgaux, « Hydrogen Ironmaking: How It Works », *Metals*, vol. 10, p. 922, juill. 2020, doi: 10.3390/met10070922.
- [136] N. Müller, G. Herz, E. Reichelt, et M. Jahn, « CO₂ Emission Reduction Potential in the Steel Industry by Integration of a Direct Reduction Process into Existing Steel Mills », p. 9, 2018.
- [137] K. Benavides *et al.*, « Emission Mitigation in the Global Steel Industry: Representing CCS and Hydrogen Options in Integrated Assessment Modeling », présenté à 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies GHGT-16, Lyon, oct. 2022, p. 37. [En ligne]. Disponible sur: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4271699
- [138] V. Vogl, M. Åhman, et L. J. Nilsson, « Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking », *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, p. 736-745, déc. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
- [139] F. Dolci, « Green hydrogen opporutnities in selected industriel processes - Workshop summary report (26th of June 2018, Centre Albert Borschette, Brussels, Belgium) », Joint Research Center, 2018.
- [140] E. Green, « The use of hydrogen in the iron and steel industry », août 2018.
- [141] S. Hornby, *Hydrogen-Based DRI EAF Steelmaking — Fact or Fiction?* 2021, p. 261. doi: 10.33313/382/124-20513-048.
- [142] M. Pei, M. Petäjäniemi, A. Regnell, et O. Wijk, « Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland », *Metals*, vol. 10, n° 7, 2020, doi: 10.3390/met10070972.
- [143] « The world's first fossil-free steel ready for delivery », Hybrit. Consulté le: 1 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hybritdevelopment.se/en/the-worlds-first-fossil-free-steel-ready-for-delivery/>
- [144] « DR-Grade Iron Ore Pellets - A Supply Overview », Midrex Technologies, Inc. Consulté le: 19 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.midrex.com/tech-article/dr-grade-iron-ore-pellets-a-supply-overview/>
- [145] « SAF Submerged Arc Furnace :: Total Materia Article ». Consulté le: 26 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=399>

- [146] B. Friedrich, M. Kalisch, D. Friedmann, R. Degel, F. Kaußen, et J. Böhlke, « The Submerged Arc Furnace (SAF): State-of-the-Art Metal Recovery from Nonferrous Slags », *J. Sustain. Metall.*, vol. 4, n° 1, p. 77-94, mars 2018, doi: 10.1007/s40831-017-0153-1.
- [147] P. Cavaliere, « Electrolysis of Iron Ores: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement », in *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes: Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement*, P. Cavaliere, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 555-576. doi: 10.1007/978-3-030-21209-4_10.
- [148] L. Hooey, J. Riesbeck, J.-O. Wikström, et B. Björkman, « Role of Ferrous Raw Materials in the Energy Efficiency of Integrated Steelmaking », *Isij International*, vol. 54, p. 596-604, 2014.
- [149] E. Jacobasch *et al.*, « Economic evaluation of low-carbon steelmaking via coupling of electrolysis and direct reduction », *Journal of Cleaner Production*, vol. 328, p. 129502, déc. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129502.
- [150] A. Hosseini *et al.*, « CFD modelling of the off-gas system of Hlsarna iron making process. Part 1: model development using detailed reaction mechanism for post-combustion of CO-H₂ mixture and carbon particles », *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 49, n° 8, p. 828-844, sept. 2022, doi: 10.1080/03019233.2022.2062929.
- [151] J. Jan van der Stel, « Hlsarna Demonstrating low CO₂ ironmaking at pilot scale », Utrecht, 4 décembre 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://www.co2-cato.org/cato-download/5540/20181211_122258_14_2018.12.04_CATO-meets-the-projects_vanderStel
- [152] M. Barberousse, C. Bono, A. Debregeas, et M. Apostolou, « Electrification of primary steel production based on ΣIDERWIN process: simulation on the European power system in 2050 », présenté à eceee Summer Study, in eceee Summer Study Proceedings. 2020, p. 435-443. [En ligne]. Disponible sur: https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2020/6-deep-decarbonisation-of-industry/electrification-of-primary-steel-production-based-on-iderwin-process-simulation-on-the-european-power-system-in-2050/
- [153] M. Draxler *et al.*, « GreenSteel D1.2 Technology Assessment and Roadmapping », GreenSteel for Europe Consortium, mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ceps.eu/ceps-projects/greensteel/>
- [154] L. de M. Hervé, « ΣIDERWIN project: electrification of primary steel production for direct CO₂ emission avoidance », 2020.
- [155] M. Sernar-Ruiz *et al.*, « SIDERWIN: A breakthrough technology to decarbonize primary steel production through direct electrification. Webinar March 23rd 2023. », 23 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://zenodo.org/record/7785032#.ZDUvPnZByUI>
- [156] « ArcelorMittal invests \$36 million in steel decarbonisation disruptor Boston Metal | ArcelorMittal ». Consulté le: 18 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-invests-36-million-in-steel-decarbonisation-disruptor-boston-metal/>
- [157] « Transforming Metal Production », Boston Metal. Consulté le: 6 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bostonmetal.com/transforming-metal-production/>
- [158] « Electra: Green Iron With No Green Premium », Electra: Green Iron With No Green Premium. Consulté le: 18 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electra.earth>
- [159] S. Hanley, « Advances In Decarbonizing Steel & Cement Manufacturing », CleanTechnica. Consulté le: 18 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://cleantechnica.com/2022/10/17/advances-in-decarbonizing-steel-and-cement-manufacturing/>
- [160] R. I. L. Guthrie et M. M. Isac, « Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future », *Metals*, vol. 12, n° 5, 2022, doi: 10.3390/met12050862.
- [161] M. Shamanian et A. Najafizadeh, « Hot Charge of Continuously Cast Slabs in Reheating Furnaces », n° 1, p. 3, 2004.
- [162] J. K. Pandit, M. Watson, et A. Qader, « Reduction of Greenhouse Gas Emissions in Steel Production », CO2CRC Ltd, Melbourne, Australia, RPT20-6205, mars 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.resourcesregulator.nsw.gov.au/sites/default/files/2022-11/report-reduction-of-ghg-emissions-in-steel-industries.pdf>
- [163] F. Zhang, Y. Zhou, W. Sun, S. Hou, et L. Yu, « CO 2 capture from reheating furnace based on the sensible heat of continuous casting slabs », *International Journal of Energy Research*, vol. 42, févr. 2018, doi: 10.1002/er.4020.
- [164] A. Haglund, « Carbon capture from reheating furnaces in the Swedish steel industry - evaluation of techno-economic feasibility », Degree project, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1446651/FULLTEXT01.pdf>
- [165] A. Krüger, J. Andersson, S. Grönkvist, et A. Cornell, « Integration of water electrolysis for fossil-free steel production », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 55, p. 29966-29977, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.116.
- [166] S. Baig, « Cost Effectiveness Analysis of HYL and Midrex DRI Technologies for the Iron and Steel-Making Industry », p. 33.
- [167] M. Son, Y. Bin, I.-B. Lee, et S.-Y. Lee, « Multi-Objective Optimization Model for the Energy System of Electric Arc Furnace Steelmaking Considering the Cost and Carbon Dioxide Emission under Uncertainty », *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, vol. 53, n° 9, p. 546-554, 2020, doi: 10.1252/jcej.20we077.
- [168] M. Wörtler *et al.*, « Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050: Technical and economic analysis of the steel sector's CO₂ abatement potential », The Boston Consulting Group, juin 2013. [En ligne]. Disponible sur: https://image-src.bcg.com/Images/Steel_Contribution_June_2013_tcm9-97801.pdf

- [169] L. Hooey, A. Tobiesen, J. Johns, et S. Santos, « Techno-economic Study of an Integrated Steelworks Equipped with Oxygen Blast Furnace and CO₂ Capture », *Energy Procedia*, vol. 37, p. 7139-7151, janv. 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.651.
- [170] JRC, « Production costs from the iron and steel industry ». Consulté le: 1 octobre 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC121276/production_costs_from_the_iron_and_stee_l_industry_-_final_online.pdf
- [171] B. Ben m'barek, A. Hasanbeigi, et M. Gray, « Global Steel Production Costs - A country and plant-level cost analysis », TransitionZero; Global Efficiency Intelligence, janv. 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/61e790b43ddb95393be8dcc1/1642565821704/Global+Steel+Production+Costs++Jan2022.pdf>
- [172] A. Toktarova, I. Karlsson, J. Rootzén, L. Göransson, M. Odenberger, et F. Johnsson, « Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry—A Swedish Case Study », *Energies*, vol. 13, n° 15, 2020, doi: 10.3390/en13153840.
- [173] « Trade Review: High freight costs, regional steel prices seen supporting ferrous scrap in Q2 ». Consulté le: 13 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/041321-trade-review-high-freight-costs-regional-steel-prices-seen-supporting-ferrous-scrap-in-q2>
- [174] « 2027 steel price forecasts scrap hrc rebar projections ». Consulté le: 13 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.steelonthenet.com/price-forecasts.html>
- [175] « Carbon Price Viewer », Sandbag Climate Campaign. Consulté le: 14 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://sandbag.be/carbon-price-viewer/>
- [176] « EUROPA - Environment - Kyoto Protocol - European Union Transaction Log ». Consulté le: 14 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/ets/welcome.do;EUROPA_EUTLPUBLI001_PRD_JSESSIONID=7mO43PPTKphzioRBZ3TB79F_JYGSRO99lI0f5dmSbSEJFJGZXTd!-795633594?languageCode=en
- [177] A. Devlin et A. Yang, « Regional supply chains for decarbonising steel: Energy efficiency and green premium mitigation », *Energy Conversion and Management*, vol. 254, p. 115268, févr. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115268.
- [178] G. Lopez, T. Galimova, M. Fasih, D. Bogdanov, et C. Breyer, « Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry », *Energy*, vol. 273, p. 127236, juin 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127236.
- [179] « Decarbonisong Steel: FORGING NEW PATHS TOGETHER », Shell, 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.shell.com/shellenergy/marketingandtrading/_jcr_content/root/main/section/simple/item/links/item0.stream/1669392117011/5b1f673472d02633f82125fef387d13c266a454d/shell-decarbonising-steel-digital.pdf#vanity-aHR0cHM6Ly93d3cuc2hlbGwuY29tL3NoZWxsZW5lcmd5L21hcmtldGluZ2FuZHRyYWRpbmcvX2pjcl9jb250ZW50L3Bhci90YWJiZWRjb250ZW50XzMzMjM1NC90YWJfNzA2OTM4MDIxL3RleHRpbWFnZS5zdHJlYW0vMTY2ODY4MTczNTAzMi81YjFmNjczNDcyZDAyNjMzMzgyMTI1ZmVmMzg3ZDEzYzI2NmE0NTRkL3NoZWxsLWRIY2FyYm9uaXNpbmctc3RlZWwtZGlnaXRhbC5wZGY
- [180] H. Trollip, B. McCall, et C. Bataille, « How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization », *Climate Policy*, vol. 22, n° 2, p. 236-247, févr. 2022, doi: 10.1080/14693062.2021.2024123.



Annexes

Annexe n°1 – Hypothèses de taux de carbone et de facteurs d'émission

Commodité	Part de carbone (kgC/kg)
Fonte	0,04
Acier	0,0004
Ferrailles	0,0009
Goudron de charbon	0,92
Benzol (C6H6)	0,85
Charbon à coke	1,00
DRI fabriqué à partir de gaz naturel	0,035

Tableau 33. Hypothèses de taux de carbone

Commodité	Unité	Facteur d'émission
Gaz de cokerie	tCO ₂ /kWh	0,000171
Gaz de haut fourneau	tCO ₂ /kWh	0,000965
Gaz de convertisseur	tCO ₂ /kWh	0,000659
Fioul domestique	tCO ₂ /kWh	0,000272
Charbon	tCO ₂ /kWh	0,000345
Charbon utilisé à l'agglomération	tCO ₂ /kWh	0,000337
Coke utilisé à l'agglomération	tCO ₂ /kWh	0,000337
Charbon à coke	tCO ₂ /kWh	0,000330
Charbon pulvérisé	tCO ₂ /kWh	0,000329
Coke	tCO ₂ /kWh	0,000404
Plastique	tCO ₂ /kWh	0,000268
Gaz naturel	tCO ₂ /kWh	0,000205
Dolomie (décarbonatation)	tCO ₂ /t	0,48
Castine (décarbonatation)	tCO ₂ /t	0,44

Tableau 34. Hypothèses de facteurs d'émission

Annexe n°2 – Hypothèses sur les prix

Afin de calculer l'évolution du coût de production avec variation de prix il a été nécessaire de fixer les hypothèses de prix des intrants. Pour les intrants ayant un effet significatif sur le coût de production (CO₂, électricité, gaz réseau, hydrogène), une valeur « haute » et une valeur « basse » ont été considérées alors que pour les autres intrants, la moyenne des prix entre 2015 et 2022 a été conservée pour les trajectoires « prix bas » et « prix haut ».

Commodité	Unité	2022	2030	2050	Source
CO ₂ (Bas)	EUR/t	78	86	146	ADEME d'après la Commission européenne (trajectoire WEM)
CO ₂ (Haut)	EUR/t		86	375	ADEME d'après la Commission européenne (trajectoire WAM)
Électricité (Bas)	EUR/MWh	87	50	48	ADEME
Électricité (Haut)	EUR/MWh		64	67	ADEME
Gaz réseau (Bas)	EUR/MWhPCI	73	29	25	ADEME
Gaz réseau (Haut)	EUR/MWhPCI		35	51	ADEME
Hydrogène (Bas)	EUR/kg	5.8	3.9	2.8	ADEME
Hydrogène (Haut)	EUR/kg		3.9	3.7	ADEME



<i>HBI</i>	<i>EUR/t</i>	468	370	360	ADEME
<i>Minerai de fer</i>	<i>EUR/t</i>	104	71	71	ADEME
<i>Charbon</i>	<i>EUR/t</i>	40	22	27	ADEME
<i>Charbon à coke</i>	<i>EUR/t</i>	38	28	34	ADEME
<i>Anthracite</i>	<i>EUR/t</i>	40	28	33	ADEME
<i>Castine</i>	<i>EUR/t</i>	18	19	19	ADEME
<i>Chaux</i>	<i>EUR/t</i>	141	89	89	ADEME
<i>Dolomie calcinée</i>	<i>EUR/t</i>	291	158	158	ADEME
<i>FeMnC</i>	<i>EUR/t</i>	1 720	1 078	1078	ADEME
<i>Fesi-75</i>	<i>EUR/t</i>	2 405	1233	1233	ADEME
<i>Aluminium pour désoxydation</i>	<i>EUR/t</i>	3 291	2 407	2 407	ADEME
<i>Ferrailles</i>	<i>EUR/t</i>	278	231	231	ADEME
<i>Pellet</i>	<i>EUR/t</i>	161	103	103	ADEME
<i>Laitier de haut fourneau</i>	<i>EUR/t</i>	60	33	33	ADEME

Tableau 35: Hypothèses ADEME sur les prix des intrants (en EUR₂₀₂₃)



Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1: Exemples de métaux d'alliage, leurs caractéristiques et potentielles applications [10], [11], [12], [13]	22
Tableau 2: Résumé des principaux laitiers issus de la sidérurgie	28
Tableau 3: Classification des sous-produits du minerai de fer pour la production d'acier [25]	32
Tableau 4: Composition des gaz de cokerie en pourcentage volumique selon différentes sources....	39
Tableau 5: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Caractéristiques des gaz sidérurgiques	40
Tableau 6: Modélisation de l'agglomération.....	43
Tableau 7: Modélisation de la cokerie.....	43
Tableau 8: Modélisation du haut fourneau.....	43
Tableau 9: Modélisation de l'aciérie (convertisseur à oxygène)	44
Tableau 10: Modélisation de la coulée continue et du laminage à chaud.	45
Tableau 11: Modélisation de l'ASU.	45
Tableau 12: Effet de l'injection de gaz de cokerie sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.	52
Tableau 13: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.	55
Tableau 14: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie de la cokerie.	55
Tableau 15: Effet de la recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du laminage à chaud.	55
Tableau 16: Effet du captage de CO ₂ après recirculation des gaz de haut fourneau sur la modélisation entrée-sortie du haut fourneau.	59
Tableau 17: Modélisation entrée-sortie du captage de CO ₂ après recirculation des gaz de haut fourneau.....	59
Tableau 18: Rôle des différents intrants du four à arc électrique.	61
Tableau 19: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés - Consommations énergétiques spécifiques.....	64
Tableau 20: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés – Sources d'émissions de procédé.....	64
Tableau 21: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés - Consommations énergétiques spécifiques.....	65
Tableau 22: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés – Sources d'émissions de procédé.....	65
Tableau 23: Hypothèses liées à la modélisation du captage de CO ₂ sur DRI-EAF.....	77
Tableau 24: Effet du captage de CO ₂ sur le laminage sur la modélisation entrée-sortie de la coulée continue et du laminage à chaud.	93
Tableau 25: Modélisation entrée-sortie du captage de CO ₂ sur le laminage.....	93
Tableau 26: Comparaison des coûts d'investissement des leviers de décarbonation de la filière primaire.....	95
Tableau 27: Synthèse des hypothèses technico-économique des leviers de décarbonation de la filière électrique.....	96
Tableau 28: Impact des leviers de décarbonation de la filière électrique sur la consommation d'électricité et les émissions de CO ₂	97
Tableau 29 : Synthèse des hypothèses de coûts en EUR courants pour la construction du coût production de la filière fonte.	100
Tableau 30: Illustration du contraste des scénarios	103
Tableau 31: Principales hypothèses retenues pour la modélisation de la demande en acier en France à horizon 2050	105
Tableau 32: Hypothèses sur le commerce international à horizon 2030 et 2050 selon les scénarios et les types d'acières	106
Tableau . Hypothèses de taux de carbone.....	151
Tableau . Hypothèses de facteurs d'émission.....	151
Tableau : Hypothèses ADEME sur les prix des intrants (en EUR ₂₀₂₃)	152

FIGURES

Figure 1: Les 9 secteurs couverts par les Plans de Transition Sectoriels	7
Figure 2: Projet Finance ClimAct.....	8
Figure 3: Visions à 360° du plan de transition.....	9
Figure 4: Émissions annuelles de GES de la sidérurgie en France [2]	10
Figure 5: Emissions directes de GES de l'industrie en 2015 selon les principaux secteurs énergo-intensifs (source : calculs ADEME sur la base des données du Citepa)	10
Figure 6: (à gauche) Schéma simplifié d'une usine de référence représentative du fonctionnement des procédés de fabrication en France ;	12
Figure 7: Structure d'un scénario dans les PTS de l'ADEME	13
Figure 8 : Panorama mondial de la production d'acier (Source : World Steel Association).....	15
Figure 9: Schéma simplifié des deux voies de production d'acier et de leurs émissions en France. ...	16
Figure 10: Production d'acier par filière en France (Source : World Steel Association).	16
Figure 11: Diagramme de Sankey de l'acier en France en 2014 (source : estimations ADEME sur la base de la cartographie des données issue de l'outil MODEIRE cf. encadré page suivante).....	17
Figure 12: Répartition de la consommation finale d'acier en France en 2014 (source : estimations ADEME sur la base de la cartographie des données issue de l'outil MODEIRE).....	18
Figure 13: Classification des principaux aciers selon la norme NF EN 10020	19
Figure 14. Répartition de la consommation finale de produits primaires et recyclés en France (source : estimations ADEME sur la base des données de l'étude négaWatt pour le compte de l'ADEME et la création de l'outil MODEIRE).....	19
Figure 15. Évolution des importations et exportations d'acier de 2014 à 2019, par type de produits (source : ADEME sur la base des données UN Comtrade)	20
Figure 16: Évolution de la production mondiale de minerai de fer par pays (source : USGS)	21
Figure 17 : Importations de minerai de fer en France selon les origines (source : ADEME sur la base des données UN Comtrade).....	22
Figure 18 : Imports (+)/Exports (-) de ferroalliages en France selon les différents types (source : données douanes).....	23
Figure 19 : Mix d'intrants matières pour la production d'une tonne d'acier inox 304 en Europe, Indonésie et Chine [14]......	24
Figure 20: Empreinte carbone d'une tonne d'acier inox 304 en Europe, Indonésie et Chine [15].....	24
Figure 21: Schéma simplifié de la construction d'un gisement de ferrailles.....	25
Figure 22: Secteurs d'origine des ferrailles en France en 2014 (source : ADEME sur la base des données de l'étude négaWatt pour le compte de l'ADEME)	26
Figure 23 : Importations (+) et exportations (-) de déchets en France selon les pays de provenance/destination (source : UN Comtrade).	26
Figure 24 : Estimation du surplus de ferrailles de qualité Q3 et Q4 et exportations nettes de ferrailles de l'Union européenne [16]	27
Figure 25 : Principales routes de production d'acier dans le monde (adapté de sources variées par Wang et al. (2020)[22])......	30
Figure 26: Schéma d'un site intégré de haut fourneau (source : ArcelorMittal [23])	31
Figure 27: Installation d'agglomération sur une grille de minerais de fer [28].	32
Figure 28: Schéma d'une usine de pellet utilisant un disque de pelletisation [25]......	33
Figure 29: Coupe d'un haut fourneau [39].	35
Figure 30: Schéma en coupe d'un haut fourneau [40].	35
Figure 31: Schéma du procédé Ruhrstahl-Heraeus [43].....	37
Figure 32: Schéma du procédé CAS-OB [46].	38
Figure 33: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Schéma de procédé.....	41
Figure 34: Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Emissions de GES.	42
Figure 35: Modélisation de la consommation spécifique d'intrants ferreux dans le convertisseur à oxygène.	45
Figure 36: Evolution du recyclage de ferrailles dans la filière fonte en France par le groupe ArcelorMittal.....	46
Figure 37: Evolution historique de la consommation d'agents réducteurs dans les hauts fourneaux en Europe [72]......	47
Figure 38: Schéma d'un haut fourneau avec injection de gaz naturel en tuyère principale telle que déjà pratiquée et la configuration avec injection au niveau en shaft (adapté de [74])......	48

Figure 39: Estimation du taux de coke en fonction du taux d'injection de gaz naturel selon trois modes d'injections : une injection en tuyère principale uniquement, une injection au shaft et une injection 50/50 en tuyère et au shaft [74].	49
Figure 40: Estimation de l'impact de l'injection de gaz naturel sur la productivité du haut fourneau selon trois modes d'injection : une injection en tuyère principale uniquement, une injection au shaft et une injection 50/50 en tuyère et au shaft [74].	49
Figure 41: Hydrogène produit par électrolyse comme agent réducteur auxiliaire au sein du haut fourneau (schéma adapté de [71]).	50
Figure 42: Effet de l'injection d'hydrogène sur les émissions directes de CO ₂ pour une teneur du vent en oxygène comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].	51
Figure 43: Taux de remplacement de coke pour une teneur du vent en oxygène comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].	51
Figure 44: Effet de l'injection d'hydrogène sur la productivité pour une teneur en oxygène du vent comprise entre 21 et 33 % et une température de 1 200 °C [79].	52
Figure 45: Schéma simplifié du procédé de recyclage des gaz de haut fourneau (TGR-BF) (adapté de [31]).	53
Figure 46: Comparaison de l'équilibre des gaz sidérurgiques sur un site intégré conventionnel (ISP), avec une technologie TGR-BF et avec une technologie COREX [52].	54
Figure 47: Usine de référence REF1 - Effet de la recirculation des gaz sidérurgiques sur les émissions de GES.	56
Figure 48: Origine des émissions annuelles de CO ₂ sur le site intégré tel que modélisé par l'IEAGHG (2013) [57].	58
Figure 49: Usine de référence REF1 - Effet de la recirculation des gaz sidérurgiques avec et sans captage sur les émissions de GES.	60
Figure 50: Schéma d'un four à arc électrique (adapté de [95]).	61
Figure 51: Chargement d'un four à arc électrique par un panier de ferrailles [21].	62
Figure 52: Coupe schématique d'un convertisseur AOD [101].	63
Figure 53: Coupe schématique d'un procédé VOD (pour « Vacuum Oxygen Decarburization ») [101].	63
Figure 54: Usine de référence REF2-1 Aciers carbone et faiblement alliés – Schéma de procédé.	64
Figure 55: Usine de référence REF2-2 Aciers inox et fortement alliés – Schéma de procédé.	65
Figure 56 : Description schématique du procédé Consteel® [104].	66
Figure 57 : Schéma de fonctionnement d'un brûleur régénératif [113].	67
Figure 58 : Schéma d'une combustion oxyfuel [114].	68
Figure 59 : Schéma d'un four à arc électrique DC alimenté en courant continu [116].	69
Figure 60: Minerai de fer préréduit sous la forme de fer briqueté à chaud, ou HBI .	72
Figure 61: Principaux procédés de réduction directe (schéma adapté de P. Cavalieri et al. (2022) [133]).	73
Figure 62: Schéma du procédé MIDREX [130].	73
Figure 63: Schéma du procédé de réduction directe Energiron/HYL [76].	75
Figure 64: Taux de conversion métallique du DRI à la sortie four MIDREX en fonction de la température et du ratio H ₂ /CO [135].	76
Figure 65: Bilan massique du carbone en entrée et sortie du DRP par tonne de DRI [136].	76
Figure 66: Proposition de design d'un procédé de réduction directe à l'hydrogène [138].	78
Figure 67: Principaux composants d'un four à arc immergé [146].	79
Figure 68: Représentation d'un four OSBF développé par TENNOVA [133].	80
Figure 69: Usine de référence REF3 DRI-EAF – Schéma de procédé.	81
Figure 70: Usine de référence REF3 DRI-EAF – Consommation énergétique du DRP en fonction de % _{vol} H ₂ (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2021) [76]).	82
Figure 71: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Emissions de CO ₂ en fonction de % _{vol} H ₂ (taux de DRI fixe de 100%).	83
Figure 72: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation électrique $\varepsilon_{el,ls}$ et production de laitier $\mu_{laitier,ls}$ de l'EAF en fonction de la quantité de DRI (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2021) [76]).	84
Figure 73: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Teneur en carbone dans le DRI en fonction de % _{vol} H ₂ (graphique reproduit à partir de N. Müller et al. (2018) [136]).	85
Figure 74: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation spécifique d'oxygène au DRP et à l'EAF en fonction de % _{vol} H ₂ .	85

Figure 75: Usine de référence REF3 DRI-EAF - Consommation spécifique de DRI et de ferrailles par l'EAF en fonction du % ferrailles dans le cas $x_c = 3,5\%$ (à gauche) et dans le cas $x_c = 0\%$ (à droite).	86
.....
Figure 76: Schéma simplifié du procédé HIsarna avec CSC [31].	87
Figure 77: Schéma de principe de l'électrolyse du minerai de fer [31].	88
Figure 78: Planning estimé de développement du projet SIDERWIN en mars 2023 [155].	89
Figure 79: Schéma du procédé d'électrolyse à sel fondu (source : Boston Metal [157]).	90
Figure 80: Schéma du procédé de coulée continue (reproduit à partir de R. Guthrie & M. Isac (2022) [160]).	91
Figure 81 : Coûts de production moyens de bobines et de fil machine en acier en EU27 en 2019 [170].	98
.....
Figure 82 : Coût de production moyen de l'acier dans différents pays, 2019-2021 [171].	99
Figure 83 : Usine de référence REF1 Site intégré de hauts fourneaux – Coût de production reconstitué entre 2015 et 2021.	101
Figure 84: Scénario Pari Hydrogéné - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050.....	107
Figure 85. Scénario Pari hydrogéné - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO ₂ entre 2022 et 2050	109
Figure 86. Scénario Pari hydrogéné – Chroniques d'investissements annuels, tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite)	110
Figure 87. Scénario Compétitivité dégradée - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050	111
Figure 88. Scénario Compétitivité dégradée - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO ₂ par effets cumulés entre 2022 et 2050	112
Figure 89. Scénario Compétitivité dégradée - Chroniques d'investissements annuels tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite).....	113
Figure 90. Scénario Sobriété et diversification - Décomposition de l'évolution de la production d'acier entre 2022 et 2050	114
Figure 91. Scénario Sobriété et diversification - Décomposition de l'évolution des émissions annuelles de CO ₂ par effets cumulés entre 2022 et 2050	115
Figure 92. Scénario Sobriété et diversification - Chroniques d'investissements annuels, tous investissements confondus (à gauche) et investissements hors voie DRI-EAF (à droite)	116
Figure 93: Décomposition de l'évolution de la production annuelle d'acier entre 2022 et 2050 selon les effets de la demande et du commerce international, par scénario	117
Figure 94 :Décomposition des émissions évitées et ajoutées en cumulé entre 2023 et 2050, par effet et par scénario	118
Figure 95: Investissements cumulés entre 2023 et 2050 dans les trois scénarios.....	119
Figure 96. Évolution des consommations d'énergie dans les trois scénarios entre 2015 et 2050	120
Figure 97. Gisement et consommation de ferrailles externes dans les trois scénarios entre 2015 et 2050	121
Figure 98. Scénario Compétitivité dégradée - Chaîne de valeur de l'acier en 2050.....	121
Figure 99:Scénario Pari hydrogéné - Chaîne de valeur de l'acier en 2050	123
Figure 100 : Scénario Sobriété et diversification - Chaîne de valeur de l'acier en 2050	124
Figure 101 : Comparaison de la structure du coût de production de l'acier primaire entre aujourd'hui et 2050, dans les trois scénarios, à prix constants	125
Figure 102: Comparaison des niveaux de coût de production de l'acier primaire entre aujourd'hui et 2050, dans les trois scénarios, avec évolution des prix	126
Figure 103. Analyse de sensibilité du coût de la transition de la filière hauts fourneaux vers les voies DRP-GN-CCS / EAF et DRP-H ₂ / EAF en fonction du prix des intrants.	128
Figure 104. Surcoût sur 15 ans des voies DRP-H ₂ / EAF, en fonction des prix de l'électricité et du CO ₂ (à gauche), et DRP-GN-CCS / EAF, en fonction des prix de l'électricité et du gaz naturel (à droite)	129
Figure 105. Comparaison des coûts d'abattement (barres bleues) et des émissions abattues (points rouges) pour les voies de décarbonation de la filière primaire.....	130



Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BEC	Bien d'équipement et de consommation
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> – Dépense d'investissement
CCS	Carbon Capture and Storage
DRI	<i>Direct Reduced Iron</i> – Minerai de fer pré-réduit
DRP	<i>Direct Reduction Plant</i> – Usine de réduction directe
DRP-GN	Usine de réduction directe fonctionnant au gaz naturel
DRP-GN-CCS	Usine de réduction directe fonctionnant au gaz naturel avec captage, transport et stockage du CO ₂
DRP-H ₂	Usine de réduction directe fonctionnant à l'hydrogène
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i> – four à arc électrique
EU-ETS	<i>European Emissions Trading System</i> – Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne
GES	Gaz à effet de serre
HBI	<i>Hot-briquetted Iron</i> – Briquettes de minerai de fer pré-réduit
HF	Haut fourneau
MACF	Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières
Mt	Mégatonne
MtCO ₂	Mégatonne de dioxyde de carbone
OPEX	<i>Operational expenditure</i> – Dépense d'exploitation
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux nous mettons nos capacités

LES COLLECTIONS DE L'**ADEME**



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES





RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



EXPERTISES

ACIER

Rapport final

La production française d'acier s'élève à 15 millions de tonnes par an et est responsable de 5% des émissions françaises de gaz à effet de serre. Aujourd'hui il existe deux voies pour produire de l'acier : la filière hauts fourneaux qui produit des aciers primaires et qui est responsable de 85% des émissions du secteur et la filière électrique qui fournit de l'acier recyclé par la conversion de ferrailles dans un four à arc électrique. Cette voie est le moyen le plus efficace de décarboner la sidérurgie mais se confronte à la disponibilité de ferrailles de haute qualité. Deux autres technologies alternatives se développent également pour produire de l'acier sans charbon : la réduction directe et l'électrolyse directe du fer. Si la réduction directe par hydrogène a fait ses preuves à l'échelle pilote, l'électrolyse du fer est encore en développement. Dans les deux cas, leur déploiement à grande échelle nécessitera des conditions favorables, notamment un prix du CO₂ élevé et un approvisionnement conséquent et compétitif en électricité décarbonée.

L'ADEME a ainsi élaboré trois scénarios contrastés pour illustrer les défis d'une décarbonation profonde de l'acier permettant d'atteindre les objectifs fixés par la stratégie nationale bas carbone de baisse de -81% d'émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 2015.

Le projet Finance ClimAct contribue à la mise en œuvre de la Stratégie National Bas Carbone de la France et de la politique européenne en matière de finance durable. Il vise à développer les outils, méthodes et connaissances nouvelles permettant (1) aux industries énergo-intensives de favoriser l'investissement dans l'efficacité énergétique et l'économie bas-carbone, (2) aux institutions financières et à leurs superviseurs d'intégrer les questions climatiques dans leurs processus de décision et d'aligner les flux financiers sur les objectifs énergie-climat, et (3) aux épargnants d'intégrer les objectifs environnementaux dans leurs choix de placements.

Le consortium coordonné par l'Agence de la transition écologique, comprend également le Ministère de la transition écologique, l'Autorité des marchés financiers, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution, 2° Investing Initiative, l'Institut de l'économie pour le climat, l'institut de la Finance Durable et RMI.

Finance ClimAct est un programme inédit d'un budget total de 18 millions d'euros et doté de 10 millions de financement par la Commission Européenne.

Durée : 2019-2024

Ce projet a reçu un financement du programme LIFE de l'Union européenne, sous la convention de subvention LIFE18IPC/FR/000010 A.F.F.A.P.



Ce travail ne reflète que le point de vue de l'ADEME. La Commission européenne et les autres membres du Consortium Finance ClimAct ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

012590



www.ademe.fr



9 791029 724084