



**JANVIER
2023**

La sidérurgie européenne se prépare pour être à la pointe de la décarbonation



Sylvie CORNOT

Centre
Énergie
& Climat

L’Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d’information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l’Ifri est une fondation reconnue d’utilité publique par décret du 16 novembre 2022. Elle n’est soumise à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L’Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l’échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n’engagent que la responsabilité de l’auteur.

ISBN : 979-10-373-0657-9

© Tous droits réservés, Ifri, 2023

Couverture : Coulage de métal dans usine métallurgique © Ded Mityay/Shutterstock

Comment citer cette publication :

Sylvie Cornot, « La sidérurgie européenne se prépare pour être à la pointe de la décarbonation », *Notes de l’Ifri*, Ifri, janvier 2023.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteure

Sylvie Cornot-Gandolphe est consultante en énergie, spécialiste des questions internationales. Depuis 2012, elle collabore avec le Centre Énergie & Climat de l'Ifri en tant que chercheuse associée, ainsi qu'avec CycloPe, la publication de référence sur les matières premières et avec CEDIGAZ, le Centre international d'information sur le gaz naturel de l'IFPEN. Sylvie a une connaissance approfondie des marchés gaziers et charbonniers mondiaux, acquise au cours de sa carrière, tout d'abord comme secrétaire général de CEDIGAZ, au sein de l'IFPEN, puis directrice de projet, au Centre du Gaz de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies à Genève, puis administrateur principal, expert en matière de gaz, à l'Agence internationale de l'Énergie (AIE), puis adjointe au directeur du Développement commercial, au sein d'ATIC SERVICES et conseiller auprès du Président pour les questions énergétiques. Elle est l'auteur de plusieurs publications de référence sur les marchés gaziers et charbonniers. Sylvie est diplômée de l'École nationale supérieure du Pétrole et des Moteurs (ENSPM).

Résumé

L'Union européenne (UE) représentait 8 % de la production mondiale d'acier en 2021, avec 153 millions de tonnes (Mt). L'industrie sidérurgique revêt une importance stratégique : elle génère 2,5 millions d'emplois, dont 308 000 d'emplois directs et représente une valeur ajoutée de 135 milliards d'euros, dont 23,4 milliards d'euros directs. Le maintien de ces actifs, et leur décarbonation (6 % des émissions), forment un enjeu crucial pour la compétitivité, la résilience et l'autonomie stratégique de l'UE. Et ce d'autant plus que l'année 2022 a provoqué un recul de la production et de la consommation, du fait des crises économiques et des coûts de l'énergie, et même l'arrêt de certaines usines, tandis que 2023 ne laisse présager aucune amélioration.

Les préparatifs pour la décarbonation de l'acier européen se sont accélérés en 2022, année charnière au cours de laquelle les principales conditions nécessaires à la transformation de l'industrie sidérurgique se sont mises en place : cadre réglementaire européen, participation aux investissements de décarbonation au niveau européen et national, marché demandeur d'acier vert et disposé à payer un premium, accélération du déploiement des vecteurs énergétiques propres et de l'infrastructure nécessaire. La hausse des prix de l'énergie, des matières premières et du carbone incite également les sidérurgistes à adopter des technologies de rupture pour décarboner plus rapidement leur production et s'affranchir de la volatilité des prix et de leur dépendance aux combustibles fossiles. Cette tendance s'est accélérée depuis l'invasion de l'Ukraine.

La voie technologique innovante H₂-DRI-EAF est la stratégie privilégiée des sidérurgistes européens. Elle permet des réductions d'émissions de 95 % par rapport à l'acier traditionnel (sous réserve que l'électricité et l'hydrogène bas carbone soient disponibles en quantité suffisante et à un coût acceptable). Le remplacement des hauts-fourneaux par cette voie technologique est déjà planifié par plusieurs grands sidérurgistes, dont ArcelorMittal, SAAB, Salzgitter, Tata Steel Netherlands (TSN) et Thyssenkrupp Steel (TKS). Cette voie technologique attire également de nouveaux acteurs dans un secteur jusqu'alors dominé par les grands groupes sidérurgiques. Les projets, actuellement en phase d'implémentation ou en attente de validation des soutiens financiers publics, pourraient remplacer un tiers de la production européenne d'acier primaire d'ici 2030, soit environ 40 Mt/an de DRI (réduction directe du minerai de fer) potentiellement produit en Europe en 2030, et permettre des réductions d'émissions significatives, dépassant l'effort demandé au secteur. En particulier, SAAB, Salzgitter et TSN ambitionnent de faire évoluer l'ensemble de leur production vers cette voie d'ici 2030 à 2033. Le conflit russo-ukrainien a accéléré les prises de décision en vue de cette transformation en profondeur. Par ailleurs, alors que la plupart des

sidérurgistes européens envisageaient une phase transitoire au cours de laquelle le DRI fonctionnerait initialement avec du gaz naturel, les sidérurgistes ont commencé à adapter leur stratégie aux nouvelles contraintes du marché gazier. Ainsi, TSN envisage maintenant de maximiser l'usage de l'hydrogène vert dès la mise en service de sa première unité de DRI. Les sidérurgistes en Allemagne suivent la même approche. La crise de l'énergie renforce la nécessité de sécuriser l'approvisionnement en hydrogène renouvelable dès le démarrage de l'unité de DRI.

La deuxième grande voie technologique de décarbonation de l'acier (CCU/CCS et intégration des procédés) est poursuivie en parallèle à la voie H₂-DRI-EAF par ArcelorMittal et TKS afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2045/2050.

Les grands acteurs adoptent des positionnements différents : certains font évoluer rapidement – d'ici 2030/2033 – l'ensemble de leur production vers la voie H₂-DRI-EAF ; d'autres poursuivent en parallèle les deux grandes voies technologiques de décarbonation et adaptent régulièrement leur stratégie à l'évolution des conditions de marché et des réglementations. La maîtrise d'une gamme étendue de technologies de décarbonation constitue un atout pour l'Europe, qui se positionne en tête de file de la décarbonation de la production d'acier mondiale.

La voie H₂-DRI-EAF, qui requiert une modification radicale des procédés, nécessite des investissements élevés – à la fois en CAPEX (dépenses d'investissement de capital) et, au moins sur une période transitoire, en OPEX (dépenses d'exploitation). Elle nécessite également des quantités élevées d'électricité et d'hydrogène propres. Si l'appui financier au secteur est en train de se mettre en place, la sécurisation de l'approvisionnement énergétique reste un défi industriel et financier majeur au cours de cette décennie. L'industrie sidérurgique est pro-active et cherche à assurer son approvisionnement en formant des partenariats avec des producteurs d'électricité renouvelable, des producteurs d'hydrogène et des compagnies internationales énergétiques. Elle investit dans le développement des énergies renouvelables et dans les électrolyseurs nécessaires à l'alimentation en hydrogène des unités de DRI.

La mobilisation accélérée des vecteurs énergétiques propres, à des conditions compétitives et à grande échelle, et la mise en place des infrastructures nécessaires vont déterminer la rapidité à laquelle l'acier européen pourra se décarboner. Au-delà du soutien financier permettant d'initier les premiers projets de décarbonation, les gouvernements ont un rôle majeur à jouer pour assurer l'accès à ces vecteurs énergétiques et à l'infrastructure nécessaire. Même si le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) doit protéger l'industrie européenne vis-à-vis des producteurs extérieurs, il n'est pas la panacée, vu notamment l'ambiguïté concernant son effet sur les exportations et qu'il existe des différences de coûts de production de l'électricité non négligeables au sein de l'UE.

Sommaire

INTRODUCTION	6
L'ACIER EUROPEEN ACCELERE SA DECARBONATION	9
Les voies de décarbonation de l'acier : innovation et circularité.....	9
Dans un contexte difficile, les prérequis se mettent en place, permettant une accélération de la décarbonation	10
UN DEFI MAJEUR DEMEURE : SECURISER L'APPROVISIONNEMENT ENERGETIQUE.....	16
Un besoin en électricité et hydrogène compétitifs très élevé.....	16
Les sidérurgistes adaptent leur stratégie aux contraintes du marché gazier	18
Des partenariats en réponse aux défis de la décarbonation.....	19
CONCLUSION	23

Introduction

L'Union européenne (UE) représentait 8 % de la production mondiale d'acier en 2021, avec 153 millions de tonnes (Mt), retrouvant alors pratiquement son niveau d'avant pandémie.¹ L'industrie sidérurgique revêt une importance stratégique pour l'économie européenne. Elle génère 2,5 millions d'emplois, dont 308 000 d'emplois directs et représente une valeur ajoutée de 135 milliards d'euros, dont 23,4 milliards directs. Elle fournit des intrants aux chaînes de valeur de la plupart des autres secteurs industriels et assure la compétitivité de pans entiers de l'économie européenne. L'acier est en effet largement utilisé dans presque toutes les industries, depuis l'industrie du bâtiment, de la construction automobile jusqu'aux appareils électroménagers. L'acier est également essentiel à la transition énergétique (éoliennes, parcs solaires, futurs réseaux d'hydrogène et de transport du CO₂, véhicules électriques). Maintenir une production au sein de l'UE est donc un objectif important pour l'indépendance européenne, la compétitivité de ses industries et une transition énergétique équitable. L'industrie sidérurgique est le secteur clé pour la décarbonation de l'économie européenne. Bien qu'elle ne représente que 6 % des émissions de l'UE (221 millions de tonnes équivalent CO₂ (MtCO₂eq) par an), c'est le plus gros émetteur du secteur industriel, responsable de près d'un quart des émissions industrielles européennes (cette part atteint 30 % en Allemagne, le premier producteur européen).

Or, l'industrie sidérurgique européenne est confrontée à de nouveaux défis majeurs, liés aux surcapacités mondiales de production d'acier, aux distorsions tarifaires, aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement et la baisse de la demande en 2020 liée à la pandémie, et plus récemment, à la hausse des prix de l'énergie, des matières premières et du CO₂, amorcée à l'automne 2021 et exacerbée depuis l'invasion de l'Ukraine. Les perspectives de récession économique dans certains pays européens aggravent encore ce tableau, avec une tendance à nouveau baissière des cours. L'énergie représente aujourd'hui près de 40 % du coût de production de l'acier, contre moins de 20 % avant les crises.² Ces évolutions, combinées à une inflation persistante et à une demande qui faiblit, entraînent actuellement des fermetures provisoires de hauts-fourneaux dans un nombre croissant de pays européens. Elles réduisent la capacité

1. La production atteignait 158 Mt en 2019. Elle avait chuté à 139 Mt en 2020. « European Steel in Figures », *Eurofer*, données couvrant les années 2021 à 2022, disponible sur : www.eurofer.eu

2. R. Epitropakis, « Les raisons qui expliquent la flambée des cours de l'acier en Europe », *L'Usine Nouvelle*, 1^{er} avril 2022, disponible sur : www.usinenouvelle.com

d'autofinancement de l'industrie, alors que celle-ci doit investir des milliards d'euros dans sa transformation. En 2022, la production européenne d'acier a ainsi baissé sensiblement (- 7.2 % en Q2 2022)³.

L'acier européen est actuellement produit selon deux filières principales⁴ :

- La filière fonte (haut-fourneau (HF) – convertisseur à oxygène, désignée par son acronyme anglais BF-BOF), dite aussi filière intégrée, dans laquelle la fonte produite à partir de charbon (*coke*) et de minerai de fer est transformée en acier par oxydation dans un haut-fourneau. Dans ces procédés requérant de très hautes températures, le charbon agit à la fois comme combustible et comme agent réducteur. La filière fonte représente 56 % de la production européenne en 2021 selon Eurofer, l'association des producteurs européens d'acier. Près de 70 % de la capacité de production est concentrée dans les pays du nord de l'Europe.
- La filière électrique (*electric arc furnace*, EAF), dans laquelle de la ferraille de recyclage (*scrap*) est refondue dans des fours à arc électrique (44 % de la production européenne). Cette voie représente la majorité de la production en Italie et en Espagne.

La filière fonte est de loin la plus énergivore et la plus carbonée : elle émet 1,9 MtCO₂/t d'acier produite (moyenne européenne), contre 0,4 MtCO₂ pour la filière électrique⁵, dont la décarbonation passe principalement par l'utilisation d'électricité renouvelable. La conversion de la filière fonte (24 sites dans l'UE d'une capacité de production de 103 Mt/an d'acier brut) vers la filière électrique permettrait de réduire les émissions. Mais en raison du besoin continu d'acier primaire de haute qualité (non recyclé), cette conversion présente des limites. La décarbonation de la filière fonte est ainsi essentielle pour atteindre les objectifs climatiques européens sans provoquer la délocalisation de la production vers des pays moins exigeants en matière climatique, un processus qui entraînerait des fuites de carbone et compromettrait la compétitivité de l'industrie européenne.

La réglementation européenne et la hausse du prix du carbone incitent fortement les sidérurgistes à décarboner leur production. En particulier, la réforme désormais actée du système d'échange de quotas d'émission (SEQE), va mettre fin progressivement d'ici à 2034 aux quotas d'émissions gratuits dont bénéficient les sidérurgistes. La mise en place du MACF doit

3. « Economic recession hits industry, downsizing steel demand expectations for 2022-2023 », *Eurofer*, Octobre 2022, disponible sur : www.eurofer.eu

4. Une seule unité de réduction directe du fer (DRI) existe actuellement en Europe à Hambourg (ArcelorMittal). Elle produit 0,6 Mt/an d'acier. Au niveau mondial, la production via la voie DRI a atteint 114 Mt d'acier brut en 2021 et représente 7 % de la production mondiale d'acier brut. Actuellement, elle utilise le gaz naturel (Moyen-Orient, États-Unis) ou le charbon (Inde) comme agent réducteur, disponible sur : www.worldstell.org

5. « Steel from Solar Energy – A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing », *Hydrogene Europe*, Octobre 2022, disponible sur : www.hydrogeneurope.eu

permettre de concilier la décarbonation du secteur et le maintien de sa compétitivité en évitant les fuites de carbone, mais la question de son impact sur les exportations européennes reste ouverte⁶.

Dès 2020, l'industrie sidérurgique européenne s'est engagée à réduire ses émissions de 30 % d'ici 2030 comparé à 2018 (ce qui correspond à 55 % par rapport à 1990) et à évoluer vers la neutralité carbone d'ici 2050⁷. Les sidérurgistes européens ont renforcé leurs engagements récemment et certains d'entre eux prévoient déjà de ne produire que de l'acier quasiment neutre en carbone, destiné à des marchés haut de gamme, d'ici 2030. Des procédés entièrement nouveaux sont nécessaires, au-delà des efforts d'efficacité énergétique et de l'augmentation du recyclage de l'acier (un matériau indéfiniment recyclable), qui ont déjà permis au secteur de réduire ses émissions de CO₂ de 26 % depuis 1990.

La décarbonation de la production d'acier est complexe et requiert un mix de solutions selon la spécificité de chaque site. Comment se positionnent les différents acteurs de la filière et comment réagissent-ils au contexte volatile et à son évolution rapide ? Quels sont les défis auxquels le secteur est confronté et quelles réponses y apporte-t-il ? Cette note se focalise sur la transformation de la filière fonte et illustre les stratégies de décarbonation et le positionnement des opérateurs.

6. « ETS Revision Sets Stronger Incentives for Clean Technologies Uptake, but €45 bn EU Steel Exports Are Still at Risk, Says Eurofer », *Eurofer*, disponible sur : www.eurofer.eu

7. « A Green Deal on Steel (update) », *Eurofer*, 19 octobre 2022, disponible sur : www.eurofer.eu

L'acier européen accélère sa décarbonation

Les voies de décarbonation de l'acier : innovation et circularité

La filière fonte est l'un des secteurs les plus difficiles à décarboner. Les stratégies de décarbonation des sidérurgistes européens se structurent autour de deux grandes voies technologiques, qui ne s'opposent pas, mais au contraire se conjuguent en parallèle afin d'atteindre la neutralité carbone et maximiser la circularité tout au long de la chaîne de valeur⁸.

- La voie *Carbon direct avoidance* (CDA), qui regroupe les technologies permettant d'éviter d'émettre du carbone lors de la fabrication de l'acier. Cette voie comprend le développement de la voie innovante de réduction directe du minerai de fer (DRI) par l'hydrogène (H₂-DRI), couplée à un four à arc électrique (DRI-EAF) utilisant de l'électricité renouvelable. Elle constitue une transformation fondamentale de la production d'acier et permet de réduire les émissions de plus de 95 % par rapport à la filière fonte. Cette voie comporte des variantes. Le DRI (ou fer spongieux) peut également être utilisé en combinaison avec la voie BF-BOF, où le DRI compacté (connu sous le nom de briquettes de fer ou HBI) est introduit dans le haut-fourneau pour réduire l'utilisation de coke et donc les émissions. Le DRI peut également être couplé à un four à oxygène basique (BOF) via une unité de fusion (concept « haut-fourneau 2.0 » développé par TKS).
- La voie *Smart Carbon Usage* (SCU), qui consiste à capter et utiliser le carbone issu de la production d'acier, *via* l'intégration des procédés et la valorisation du carbone (*Carbon Valorisation*, CV), son utilisation (*Carbon Capture and Usage*, CCU) ou son stockage permanent (*Carbon Capture and Storage*, CCS). Cette voie est essentielle sur le moyen/long terme pour capter le CO₂ résiduel et atteindre la neutralité carbone, voire créer des émissions négatives *via* le BECCS (CCS couplé à la bioénergie). Elle fait appel à des procédés innovants de captage du CO₂ (par exemple DMX, procédé développé par l'IFP Énergies Nouvelles

8. Il convient de noter que d'autres voies technologiques sont étudiées mais leur maturité technologique n'est pas encore assurée : l'extraction électrolytique (*electrowinning*), qui est testée par ArcelorMittal et l'électrolyse en milieu oxydes fondus (*molten oxide electrolysis*, MOE), développée par la start-up américaine Boston Metal.

(IFPEN), ou Cryocap développé par Air Liquide), permettant d'accroître le taux de capture du CO₂ et d'optimiser le coût. Elle concerne également des projets visant l'utilisation du CO₂ pour la production de produits chimiques de base, de carburants de synthèse et de matériaux tels que le plastique.

Par ailleurs, ces deux voies technologiques s'inscrivent dans un modèle d'économie circulaire, qui repose sur la circularité des ressources, de l'énergie et des matériaux à faible empreinte carbone tout au long de la chaîne de valeur. Ce principe est établi en partenariat avec les grands utilisateurs d'acier (constructeurs automobiles par exemple) et les fournisseurs (en particulier avec les fournisseurs d'électricité et d'hydrogène renouvelables). Les projets d'économie circulaire concernent notamment (mais pas seulement) l'augmentation du recyclage de l'acier, essentielle pour réduire les émissions de CO₂ à court terme. Par exemple, elle devrait permettre à ArcelorMittal France de réduire ses émissions de CO₂ à Fos-sur-Mer de 20 % d'ici 2030. Les projets d'économie circulaire concernent également la recherche de substituts au charbon (Torero à Gand). En outre, la révolution numérique et la digitalisation des opérations accompagnent la transformation du secteur.

Dans un contexte difficile, les prérequis se mettent en place, permettant une accélération de la décarbonation

Les crises des prix de l'énergie incitent l'UE et les sidérurgistes à accélérer la transition énergétique et la transformation de la production d'acier vers de nouvelles voies de production, à la fois plus respectueuses de l'environnement et garantissant la sécurité énergétique de l'Europe et son autonomie. La communication REPowerEU du 8 mars 2022 et le plan d'action du 18 mai⁹, visent, entre autres, à accélérer significativement la production d'énergie renouvelable (avec une capacité installée de 592 gigawatt (GsW) d'énergie solaire et de 510 GW d'éolien d'ici 2030) et l'approvisionnement en hydrogène propre¹⁰ de l'Europe (20 Mt/an d'ici 2030, dont 10 Mt produites localement et 10 Mt importées), afin de réduire

9. « REPowerEU: Joint European Action for More Affordable, Secure and Sustainable Energy », European Commission, disponible sur : www.ec.europa.eu; « Implementing the Repower EU Action Plan: Investment Needs, Hydrogen Accelerator and Achieving the Bio-Methane Targets », Commission Staff Working Document, 18 mai 2022, disponible sur : www.eur-lex.europa.eu

10. Cette note utilise le terme hydrogène propre, qui englobe l'hydrogène renouvelable produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable (hydrogène vert) et l'hydrogène bas-carbone/décarboné (électrolyse de l'eau avec de l'électricité nucléaire ou reformage du gaz avec CCS à condition que les exigences de production bas carbone définies par la CE soient respectées). Dans sa définition des carburants (gazeux ou liquides) renouvelables d'origine non biologique (RFNBO), l'UE inclut les carburants qui réduisent les émissions de 70 % par rapport à la référence carbonée.

la dépendance européenne vis-à-vis des combustibles fossiles russes. Le plan met en place des actions concrètes, soutenues par des investissements massifs et la mise en place d'un cadre réglementaire incitatif. Dans le secteur de l'acier, il vise à décarboner environ 30 % de la production d'acier primaire européenne d'ici 2030 en utilisant de l'hydrogène propre (ce qui nécessite 1,5 Mt/an d'hydrogène). Le plan renforce la stratégie industrielle européenne, présentée en mars 2020 et mise à jour en mai 2021, qui définit les instruments pour soutenir la transition de l'UE vers la neutralité climatique, et plus particulièrement celle de l'acier. La stratégie européenne a créé l'Alliance européenne pour l'hydrogène propre (*European Clean Hydrogen Alliance*) pour soutenir le déploiement à grande échelle des technologies d'hydrogène propre d'ici 2030 et le Partenariat sur l'acier propre (*Clean Steel Partnership*)¹¹, qui vise à faire évoluer les technologies de rupture de la production d'acier vert vers la maturité industrielle d'ici 2030, en particulier, les technologies H2-DRI d'un niveau de maturité technologique (TRL) 6-7 en 2022 à un niveau TRL 9 d'ici 2030.¹² Le plan REPowerEU accélère également les objectifs du paquet *Fit for 55*. Notamment, les négociations en cours portent sur l'accroissement de la part des énergies renouvelables à 40-45 % du mix énergétique d'ici 2030, dont une part de 50 % d'hydrogène renouvelable (carburants renouvelables d'origine non biologique, RFNBO) dans l'industrie (70 % d'ici 2035, selon la position du Parlement Européen, éloignée de celle du Conseil)¹³.

La décarbonation de l'acier requiert des investissements élevés qui doivent être décidés dès maintenant afin d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de 2030. Selon Eurofer, la réduction des émissions du secteur de 55 % d'ici 2030 requiert 85 milliards d'euros, dont des investissements (CAPEX) de 31 milliards d'euros et des coûts opérationnels (OPEX) estimés à 54 milliards d'euros¹⁴. Les coûts de production de l'acier vert seraient de 35 % à 100 % plus élevés que ceux de l'acier traditionnel, selon les prix de l'hydrogène et de l'électricité, mais ce surcoût devrait se réduire à moyen terme, grâce aux réductions de coûts de production de l'hydrogène attendues d'ici 2030.¹⁵ Pour que l'acier européen reste compétitif dans un contexte de concurrence mondiale, en plus des

11. Le Clean Steel Partnership, officiellement lancé en juin 2021, dispose d'un budget de 1,7 milliards d'euros (dont 700 millions d'euros sur fonds européens et un milliard d'euros sur fonds privés).

12. C. Ryman, « The HYBRIT Demonstration of a Fossil-Free Iron – And Steelmaking Value Chain », 12 mai 2022, disponible sur : www.provadis.com

13., "Historical Day for Green Hydrogen", *Hydrogen Europe*, 14 septembre 2022, disponible sur : <https://hydrogeneurope.eu>

14. « The Clean Steel Partnership a Driver to Net Zero, from Research to Deployment of Ground-Breaking Technologies for Steel », 1^{er} juin 2022, disponible sur : www.eurofer.eu

15. Il convient de noter que dans le contexte très volatile du prix des énergies, ce surcoût évolue mais demeure significatif. Voir par exemple les estimations récentes d'Hydrogen Europe, disponible sur : www.hydrogeneurope.eu

investissements privés, l'appui des pouvoirs publics est crucial pour initier les investissements, compenser les coûts plus élevés que ceux de l'acier traditionnel, et assurer une concurrence équitable par rapport aux pays non européens moins exigeants en matière climatique.

La Commission européenne (CE) a mis en place des programmes de financement, en particulier, le Fonds Innovation, les Projets Importants d'Intérêt Européen Commun (IPCEI) sur l'hydrogène, Horizon Europe, InvestEU, le Clean Steel Partnership. Combinés avec la mise en place de plans nationaux sur l'acier et d'aides d'État au secteur (participation à l'investissement initial et contrats carbone pour la différence, CCfD), ces financements permettent aux sidérurgistes européens d'amorcer la conversion de la sidérurgie vers des technologies de décarbonation. La France, par exemple, a annoncé une enveloppe de 1,7 milliards d'euros pour accompagner la décarbonation des sites de Dunkerque et Fos-sur-Mer. La CE a validé une aide d'État allemande, portant sur la décarbonation de l'industrie, dont celle de l'acier, d'un budget de 27,5 milliards d'euros sur 10 ans. Début octobre 2022, elle a autorisé une aide d'État portant sur 1 milliard d'euros visant à aider Salzgitter à décarboner ses procédés de fabrication de l'acier en utilisant de l'hydrogène, notamment de l'hydrogène renouvelable produit sur site grâce à une nouvelle installation.

La transformation de la production d'acier est également poussée par la demande en acier « vert » des grands industriels : l'industrie automobile en première ligne car le surcoût de l'acier vert ne représente qu'un faible coût sur le prix de vente final, mais aussi les producteurs d'électricité renouvelable, éolien et solaire, dont les moyens de production ont une intensité en acier largement supérieure à celle des moyens traditionnels de production d'électricité. Ces derniers, désireux d'atteindre leurs objectifs de réduction d'émissions à l'horizon 2030 et d'offrir des produits décarbonés à leur clientèle, sont demandeurs d'acier à faible teneur en carbone. Les sidérurgistes s'appuient également sur des initiatives lancées en 2021, telles que l'Industrial Deep Decarbonisation Initiative (IDDI) ou la SteelZero Initiative, à travers lesquelles les gouvernements et les industriels se sont engagés à acheter de l'acier à faible teneur en carbone. Un marché européen de l'acier vert est en train de se mettre en place. Les sidérurgistes qui ont amorcé la décarbonation de leur production proposent des gammes d'acier à faible empreinte carbone (par exemple, Xcarb, Bluemint, Zeremis Carbon Lite, Greentec Steel). Ces aciers sont certifiés par des audits indépendants, alors que l'organisation Responsible Steel est en train de mettre en place un système de certification mondiale.¹⁶

16. R. Dey Bera, « Responsible Steel to Introduce Global Steel Certification », *Fast Markets*, 1^{er} juillet 2022, disponible sur : www.fastmarkets.com

En mai 2022, Eurofer recensait 60 projets de décarbonation de l'acier pour cette décennie.¹⁷ La voie H2-DRI-EAF est la voie privilégiée des sidérurgistes européens. Non seulement elle permet de décarboner la production d'acier et d'éliminer l'exposition au risque prix du carbone, mais elle permet également de s'affranchir de la dépendance aux combustibles fossiles et de la volatilité de leurs prix, ce qui réduira le risque de volatilité des coûts d'exploitation des producteurs d'acier. L'arrêt des hauts fourneaux et leur remplacement par cette voie technologique sont déjà planifiés par plusieurs grands sidérurgistes de l'UE, dont SSAB, ArcelorMittal, Salzgitter, TKS, et TSN. Ces projets sont actuellement en phase d'implémentation ou en attente de validation des soutiens financiers publics. La voie innovante H2-DRI concerne maintenant des projets de démonstration à l'échelle industrielle et même des réalisations industrielles (2,5 Mt/an) à partir de fin 2025. C'est une nette accélération du calendrier. En 2020, les sidérurgistes ne prévoyaient des réalisations industrielles que pour l'après 2030, voire d'ici 2040. Le projet suédois HYBRIT, qui, en 2021, a produit les premières tonnes d'acier au monde *via* la voie DRI utilisant de l'hydrogène renouvelable, ouvre la voie à une mutation fondamentale de la sidérurgie européenne, voire mondiale. Il montre également à quelle vitesse la transition peut se produire : il y a quelques années, la possibilité de produire de l'acier vert aurait ressemblé à de la science-fiction. Aujourd'hui, l'acier vert a fait son entrée sur le marché européen. En tenant compte des projets recensés par Eurofer et des annonces depuis mai 2022, environ 40 Mt/an de capacité de H2-DRI pourrait être opérationnelle en 2030, dont 31 Mt/an en remplacement des hauts-fourneaux, ce qui correspond à environ 35 Mt d'acier brut, soit un tiers de la capacité de la production d'acier primaire de l'UE (voir tableau 1).

La voie SCU progresse également, avec des millions d'investissement en cours ou annoncés, principalement dans des projets de CCU visant la production de produits chimiques de base et de carburants de synthèse (Carbon2Chem, Steelanol, CarbHFlex, Reuze) et des projets de valorisation du carbone (IGAR). Depuis l'abandon de l'option CCS par TSN, deux seuls projets concernant le CCS existent aujourd'hui (projet 3D à Dunkerque et Gand Carbon Hub en Belgique).

17. « Low-CO₂ Emissions Projects in the EU Steel Industry », *Eurofer*, 17 novembre 2022, disponible sur : www.eurofer.eu ; « EU Steel Industry's Decarbonization Projects Could Cut Emissions by a Third », *Eurofer*, 2 juin 2022, disponible sur : www.eurometal.net

Tableau 1 : Projets de DRI-EAF dans l'UE (septembre 2022)

Pays Sites sidérurgiques Sociétés	Capacité de production actuelle (Mt/an d'acier liquide)	Technologie de transformation	Capacité de production de DRI (Mt/an)	Capacité de production d'acier vert (Mt/an)	Année de mise en service	Remarques
Allemagne						
Hambourg ArcelorMittal	1,1	H2-DRI	0.1 (2025) - 0,7 (2030)	1,1 (2030)	2025-2030	Conversion du DRI existant du gaz naturel à l'H2. 2025: démonstrateur (en construction) : 100 000 t/an de DRI. Utilisera de l'H2 gris. 110 million € (cofinancé par le gouvernement). 2030 : 1.1 Mt/an d'acier. Collaboration avec Shell, Mitsubishi et d'autres industriels pour former le Hamburg Green Hydrogen Hub (HGHH). 1 à 1,5 milliards € prévus pour la transformation d'Hambourg, Brême et Eisenhüttenstadt d'ici 2030 (en attente de validation du soutien financier).
Brême/Eisenhüttenstadt ArcelorMittal	4/2.3	H2-DRI-EAF	non spécifié ; 3,2 (est) (2030)	3,6	2030	Remplacement de 2 HF (1 sur chaque site) par la voie H2-DRI-EAF. Réduction des émissions jusqu'à 5 Mt/an en 2030, selon disponibilité H2 renouvelable (initialement, utilisation du gaz naturel) Ensuite, H2 du réseau régional North German Clean Hydrogen Coastline. A Brême, ArcelorMittal est partenaire de HyBit (Hydrogen for Bremen's industrial transformation). Accord de coopération avec RWE pour développer l'éolien offshore et des électrolyseurs pour approvisionner les sites de Brême et d'Eisenhüttenstadt (pilote de 70 MW d'ici 2026 ; des projets de l'ordre du GW à long terme - sous réserve de l'approbation de fonds publics)
Salzgitter Salzgitter AG	4,8	H2-DRI-EAF	4,2 (2,1 fin 2025, 2,1 en 2030)	5,7 (d'ici fin 2033) (3,8 Mt en 2030)	Fin 2025-2033	Conversion de l'ensemble de la production d'ici 2033 en trois phases (2 DRI et 3 EAF). Initialement utilisera le gaz naturel, puis l'hydrogène renouvelable. Investissement de 723 millions € en juillet 2022 pour la 1 ^{ère} phase
Duisbourg TKS	11,6	H2-DRI-Unité de fusion	2,5 (2026), 2 est (2030)	5	2026-2030	2 milliards € pour la 1 ^{ère} phase (8 milliards € conversion complète). DRI 2.5 Mt/an en 2026 (contre 1.2 Mt/an prévu initialement). Dans le concept initial, une deuxième unité de DRI d'ici 2030 pour produire 5 Mt/an d'acier vert.
Dillingen et Völklingen Dillinger/Saarstahl	4,8	H2-DRI-EAF (Dillingen) ; EAF (Völklingen)	2,5	3,5	2027	Fermeture d'un des 2 HF de Dillingen d'ici 2027. Le DRI utilisera en partie de l'H2 renouvelable dès 2027 (projet IPCEI H2Syngas). Réduction des émissions de 60 %. En attente de validation du soutien financier.
Autriche						
Linz et Donawitz Voestalpine	5,7	EAF-HBI-scrap	-	non spécifié	Début 2027 (1 ^{ère} phase)	1 milliard €. Décision finale d'investissement en 2023. 1 ^{ère} phase : 2 EAF. Approvisionnement en HBI produits à Corpus Christi, entre autres. Réduction des émissions de 30 % (3-4 MtCO2). Sur le long terme, décarbonation basée sur l'H2.
Belgique						
Gand ArcelorMittal	4,4	H2-DRI-EAF	2,5	non spécifiée	2030	1,1 milliard €. En attente de validation du soutien financier. 1 DRI et 2 EAF. Passage progressif du BF au DRI-EAF (remplacement du HF A atteignant sa fin de vie d'ici 2030). Réduction des émissions de 3 Mt/an (3,9 Mt/an en incluant les autres initiatives, Steelanol, Torero).
Espagne						
Gijón/Sestao ArcelorMittal	4,5	H2-DRI-EAF	2,3	1,1 (Gijón) 1,6 (Sestao)	2025	1 milliard €. En phase d'implémentation. 1 DRI approvisionné en H2 renouvelable et 1 EAF à Gijón. Les 2 EAF existants de Sestao (2 Mt/an) seront approvisionnés par le HBI de Gijón (1 Mt/an) à partir de 2025. Utilisation d'électricité renouvelable, de CO2 biogénique et d'H2 vert pour produire de l'acier 100 % neutre en CO2 à Sestao (env. 1,6 Mt/an). 4,8 Mt/an de réduction des émissions.
Espagne/Péninsule ibérique						
Localisation à déterminer H2 Green Steel (H2GS)		H2-DRI	2	(2,5-5 à l'étude)	2025/2026	Nouveau site à l'étude. 2,3 milliards €. L'unité de DRI sera construite et exploitée par H2GS, qui étudie la colocalisation de production d'acier (2,5-5 Mt/an). JV avec Iberdrola pour 1 GW de capacité d'électrolyse. Electricité renouvelable fournie par Iberdrola.
Finlande						
Raahе SSAB	2,4	EAF-scrap/HBI	-	non spécifié	2030	Conversion des 2 HF dès 2030 (stratégie SAAB annoncée en janvier 2022), conditionnée à un approvisionnement suffisant en électricité renouvelable
France						
Dunkerque ArcelorMittal	6,8	H2-DRI-EAF	2,5	4,5	2027	1,7 milliards (pour Dunkerque et Fos). En attente de validation du soutien financier. Remplacement de 2 HF d'ici 2030. 1 DRI, SAF (2 Mt/an), EAF (2,5 Mt/an). Réduction totale des émissions de 40 % (7,8 Mt/an) d'ici 2030 (comprend Fos et autres initiatives)
Fos-sur-Mer ArcelorMittal	5,2	EAF-scrap	-	2	2027	Remplacement d'un HF d'ici 2030
Fos-sur-Mer GravitHy		H2-DRI	2		2027	Nouveau site. 2,2 milliards €. DRI basé sur l'H2 renouvelable et bas carbone
Pays-Bas						
Ijmuiden Tata Steel Netherlands (TSN)	6,3	H2-DRI-EAF	3,5	non spécifié	2029 (1 ^{ère} phase)	1 ^{ère} phase : 2029, conversion du HF7 au DRI - EAF 2 ^{ème} phase : entre 2032 et 2037 : conversion du HF6 Coût total à l'étude. Accord préliminaire avec le gouvernement en juillet 2022. TSN vient d'investir 65 millions € pour l'étude d'ingénierie (étude confiée à Danieli, Hatch et McDermott)

Pays Sites sidérurgiques Sociétés	Capacité de production actuelle (Mt/an d'acier liquide)	Technologie de transformation	Capacité de production de DRI (Mt/an)	Capacité de production d'acier vert (Mt/an)	Année de mise en service	Remarques
République Tchèque						
Ostrava Liberty Steel	3,2	EAF-HBI/scrap	-	3,5	2025-2027	350 millions €. Projet GREENSTEEL en cours d'implémentation. 2 EAF commandés à Danieli en juillet 2022. Réduction des émissions de plus de 80 % d'ici 2027. Les EAF fonctionneront initialement (2025) avec de la fonte brute et du DRI/HBI pour une utilisation jusqu'à 100 % de scrap dans la deuxième phase du projet (2027). Les fours utiliseront de l'électricité renouvelable. Memorandum signé avec CEZ en juillet 2022 pour l'électricité renouvelable et l'H2.
Roumanie						
Galati Liberty Steel	3,2	H2-DRI-EAF-scrap	2,5	4	2027	2 EAF (soumissionés en juillet 2022), qui augmenteront la production d'acier à 4 Mt/an. L'unité de DRI fonctionnera initialement au gaz naturel avant d'utiliser l'hydrogène vert. Réduction des émissions de 60 %. Le projet prévoit un parc solaire de 180 MW et un parc éolien de 20 MW.
Slovaquie						
Kocise US Steel	2,85	EAF-HBI/scrap	-	3,1	2025	1,3 milliards €. En attente de validation du soutien financier. Conversion des 2 HF vers 2 EAF.
Suède						
Oxelösund SAAB/HYBRIT	1,8	EAF-HBI/scrap	-		Fin 2025	En cours d'implémentation. Fermeture des 2 HF fin 2025.
Luleå SAAB	2,2	EAF-HBI/scrap	-		2030	Conversion du HF dès 2030 (stratégie SAAB annoncée en janvier 2022), conditionnée à un approvisionnement suffisant en électricité renouvelable.
Gällivare LKAB/HYBRIT		H2-DRI/HBI	1,35-2,7		Fin 2025-2030	Production de DRI/HBI sans fossiles. En cours d'implémentation (1 ^{ère} phase). Utilisera la technologie Energiron.
Kiruna, Malmberget, Svappavaara LKAB		H2-DRI/HBI	Totalité de la production de minerai (28 Mt/an)		Long terme	LKAB prévoit de convertir l'ensemble de sa production de minerai en DRI/HBI neutres en carbone (H2 renouvelable et biocombustibles) d'ici 2045. LKAB prévoit de construire six unités DRI utilisant l'hydrogène, trois à Malmberget et trois à Kiruna. Requier des investissements de SEK 15 à 20 milliards/an.
Boden H2 Green Steel (H2GS)		H2-DRI-EAF	2,1 (2025); 4,2 (2030)	2,5 (2025) - 5 (2030)	2025-2030	Nouveau site en construction. 2,5 milliards € 2025 : DRI-EAF (2,5 Mt/an d'acier) ; 2030 : 5 Mt/an d'acier

Source : Auteur d'après Eurofer, www.eurofer.eu, Leadership Group for Industry Transition (LeadIT), www.industrytransition.org et communications des sociétés

Un défi majeur demeure : sécuriser l’approvisionnement énergétique

Un besoin en électricité et hydrogène compétitifs très élevé

Si la transformation en profondeur de la production européenne d’acier est en train de se mettre en place, un obstacle majeur au remplacement des hauts-fourneaux par la voie H₂-DRI demeure : la sécurisation de l’approvisionnement énergétique. Cette voie technologique nécessite des quantités élevées d’électricité et d’hydrogène propres, et ce dès cette décennie, alors que les mix électriques des pays européens ne sont pas complètement décarbonés, que les besoins en électricité renouvelable du secteur s’ajoutent à ceux de la nécessaire décarbonation des réseaux électriques et à l’électrification directe des usages finaux et que l’hydrogène propre est un marché tout juste naissant. À cela, s’ajoute la crise de l’énergie provoquée par le conflit russo-ukrainien.

L’approvisionnement en énergie bas carbone et renouvelable, disponible à grande échelle à des prix abordables, est l’un des principaux défis de la décarbonation de la sidérurgie. Eurofer estime les besoins en électricité des projets en cours à plus de 150 TWh/an d’ici 2030, dont plus de la moitié pour la production d’hydrogène¹⁸. Selon Hydrogen Europe, la production d’une tonne d’acier par la voie H₂-DRI-EAF nécessite environ 3,6 MWh d’électricité¹⁹. Décarboner l’ensemble de la production primaire d’acier de l’UE – ce qui permettrait une réduction des émissions de près de 200 Mt – nécessiterait environ 370 TWh, dont environ 260 TWh pour la production d’hydrogène (5,3 Mt).

18. « The Clean Steel Partnership A driver to net zero, from research to deployment of ground-breaking technologies for steel », *Eurofer*, 1^{er} juin 2022, disponible sur : www.estep.eu

19. Un kilogramme d’hydrogène nécessite environ 50 à 55 kWh d’électricité et la production d’une tonne d’acier nécessite environ 51 kg d’hydrogène (ce besoin varie selon le pourcentage de scrap utilisé). Ainsi, il faudrait environ 2,55-2,8 MWh pour produire l’hydrogène nécessaire à une tonne d’acier. En ajoutant l’électricité supplémentaire nécessaire pour le four à arc électrique et les besoins en chaleur des procédés, l’électricité totale nécessaire par tonne d’acier s’élève à environ 3,35-3,6 MWh. Sources : « Hydrogen use in industry », Rapport 2020, Bellona, disponible sur : www.frompollutiontosolution.org ; « Solar Market Insight Report 2022 Q2 », SEIA, 7 juin 2022, disponible sur : www.seia.org

Le coût de production élevé de l'hydrogène renouvelable est également un frein à son adoption, bien qu'aux prix actuels des énergies, ce surcoût se soit réduit. Selon Hydrogen Europe, au prix de livraison actuel de l'hydrogène (estimé à 5,3€/kg, comprenant les coûts de production, transport et stockage), les coûts totaux de production de l'acier vert sont supérieurs à ceux de la filière BF-BOF de 126€/t d'acier brut, aux prix élevés des énergies et des matières premières actuels, et de 203€/t d'acier brut dans un scénario de normalisation des prix²⁰. Hydrogen Europe estime qu'un prix de livraison de l'hydrogène inférieur à 3,0€/kg – dans le scénario prix élevés, et inférieur à 1,5€/kg dans le scénario de prix normalisés, est nécessaire pour atteindre le point d'équilibre. Dans les deux scénarios, le point d'équilibre pour le CO₂ est de 140€/t.

Au-delà des problèmes de disponibilité et de coûts, l'intermittence de la production d'hydrogène basée sur le solaire ou l'éolien requiert des moyens de stockage pour exploiter les unités de DRI sur une base continue. De même, les fours à arc électrique nécessiteront une fourniture d'électricité stable pour être exploités de façon rentable. Sur le moyen terme, l'approvisionnement en hydrogène en quantités suffisantes nécessitera l'intégration des installations dans les réseaux d'hydrogène régionaux, nationaux et européens, mais la réglementation et l'infrastructure ne font qu'émerger (e.g. négociations en cours sur la version finale de la Directive sur les énergies renouvelables, RED III).

Ainsi, la décarbonation de la production européenne d'acier dépend du déploiement rapide de l'hydrogène propre et de la baisse des coûts attendue grâce à la massification de la production. De manière corollaire, elle dépend de la construction de capacités de production d'électricité renouvelable (ou nucléaire ou décarbonées) suffisantes et des infrastructures nécessaires à ce déploiement (lignes à haute tension, réseaux d'hydrogène et moyens de stockage de l'énergie). Le plan REPowerEU a significativement accéléré l'objectif de déploiement de l'hydrogène propre, avec 20 Mt/an produites et importées en Europe d'ici 2030. Les gouvernements européens ont également renforcé leurs objectifs de production/importation d'hydrogène propre. Il n'en demeure pas moins que la mise en place des capacités gigantesques d'électrolyseurs, d'éoliennes, de parcs solaires, de lignes à haute tension, de chaînes d'approvisionnement international en hydrogène, etc., reste un défi industriel et financier majeur au cours des huit prochaines années, auquel se rajoute le défi technologique de faire évoluer les technologies H₂-DRI vers la maturité industrielle.

20. G. Pawelec et J. Fonseca, « Steel From Solar Energy – A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing », *Rapport Hydrogen Europe*, Mai 2022, disponible sur : www.hydrogeneurope.eu

Les sidérurgistes adaptent leur stratégie aux contraintes du marché gazier

Afin de contourner le problème de disponibilité en hydrogène à court terme, la plupart des sidérurgistes ont envisagé une phase de transition pendant laquelle le gaz naturel alimentera l'unité de DRI. Les unités de DRI modernes sont flexibles et capables d'utiliser le gaz naturel et l'hydrogène dans des proportions pouvant varier de 0 % à 100 %. L'utilisation du gaz naturel permet à la fois d'amorcer rapidement la transition des hauts-fourneaux vers le DRI et de réaliser des réductions d'émissions importantes en attendant que des quantités suffisantes d'hydrogène propre soient disponibles. La voie DRI-EAF avec une unité de DRI alimentée au gaz naturel émet 0,55 tCO₂/t d'acier (soit une réduction de 67 % par rapport aux meilleures technologies BF-BOF disponibles – 1,64 tCO₂/t d'acier).²¹ Avec l'hydrogène bleu, ces émissions peuvent être réduites à 0,11 tCO₂/t d'acier (- 93 %), à comparer à 0,05 tCO₂/t d'acier (- 97 %) dans le cas du DRI-EAF utilisant exclusivement des énergies renouvelables.

Pour répondre aux exigences de production bas carbone, les problématiques liées à l'utilisation du gaz naturel, avec ou sans CCS, se concentraient jusqu'à présent sur les fuites de méthane, qui devaient être proches de zéro, et, dans le cas du gaz naturel avec CCS (hydrogène bleu), également sur le taux de captage du CO₂ qui devait être très élevé (au-dessus de 90 %), ainsi que sur la disponibilité d'infrastructures de transport et de stockage du CO₂. Mais depuis le conflit russo-ukrainien, tout est mis en œuvre pour réduire la consommation européenne de gaz naturel. Il n'est donc pas certain que l'approvisionnement en gaz naturel nécessaire pour initier les premiers projets soit disponible, même si les volumes additionnels de gaz naturel nécessaires resteraient modestes (7 gigamètres cube (Gm³) par an de gaz naturel en 2030, soit environ 2 % de la consommation de gaz naturel de l'UE)²² et pourraient être couverts par des achats auprès de fournisseurs non russes. La sécurité de l'approvisionnement gazier diffère d'un pays à un autre selon la dépendance au gaz russe et est un sujet particulièrement sensible en Allemagne.

Les sidérurgistes ont commencé à adapter leur stratégie à cette nouvelle contrainte. Ainsi, TSN envisage maintenant de maximiser l'usage de l'hydrogène vert dès la mise en service de sa première unité de DRI, alors qu'en septembre 2021, quand le groupe avait opté pour l'option DRI, il

21. R. SU et A. Assous, « Starting from Scrap – The Key Role of Circular Steel in Meeting Climate Goals », *Sandbag*, juin 2022, disponible sur : <https://sandbag.be> (à noter que ces valeurs sont des réductions maximales).

22. *Ibid.* -Calculé à partir des hypothèses faites dans l'étude de Sandbag (EAF avec 20 % de scrap et 18,2 Gm³ nécessaires pour décarboner 75 Mt de production d'acier). Inclut tous les projets de DRI listés dans le Tableau 1 susceptibles d'utiliser du gaz naturel initialement (25.4 Mt de DRI en 2030, soit environ 28 Mt d'acier brut) et prend l'hypothèse que tous le font à 100 % en 2030, ce qui est une hypothèse maximale.

envisageait d'initier cette transformation avec le gaz naturel. Les sidérurgistes en Allemagne suivent la même approche. La crise de l'énergie renforce la nécessité de sécuriser l'approvisionnement en hydrogène renouvelable dès le démarrage de l'unité de DRI.

Des partenariats en réponse aux défis de la décarbonation

Afin de sécuriser leur approvisionnement en hydrogène propre, les stratégies des sidérurgistes comportent toutes des alliances stratégiques :

- ▀ Avec des fournisseurs d'électricité renouvelable,
 - pour produire de l'hydrogène directement sur site ou à proximité (par exemple TKS avec STEAG à Duisbourg, 520 MW d'électrolyse, HYBRIT avec Vattenfall, 500 MW d'électrolyse, TSN avec le port d'Amsterdam et Hydrogen Chemistry Company (HyCC) à Ijmuiden, 100 MW et jusqu'à 1 GW) ;
 - pour développer conjointement des capacités d'énergie renouvelable couplées à la production d'hydrogène vert.

Le joint-venture annoncé par ArcelorMittal et RWE en Allemagne portant sur le développement de capacités éoliennes offshore signale une intégration majeure du sidérurgiste dans la production d'électricité et d'hydrogène renouvelables.²³ De nombreux producteurs d'acier ont conclu des contrats d'achat d'énergie renouvelable sur plusieurs années (par exemple H2 Green Steel avec Statkraft) ou installent des sources d'énergie renouvelables. Salzgitter, par exemple, a construit un parc éolien (WindH2) sur son site, et Liberty Steel prévoit un parc solaire de 180 MW et un parc éolien de 20 MW à Galati.

- ▀ Avec des fournisseurs d'hydrogène, e.g. Air Liquide en France (Dunkerque) et en Allemagne (Duisbourg).
- ▀ Avec des compagnies énergétiques internationales ou nationales en vue de s'approvisionner en hydrogène importé : e.g. TKS et BP, permettant à TKS d'accéder au portefeuille de production d'hydrogène que BP est en train de développer en Europe et dans le monde ; Salzgitter et Uniper, permettant à Salzgitter d'accéder à l'hydrogène produit ou importé à Wilhelmshaven.

Dans leurs stratégies d'approvisionnement, les producteurs d'acier s'adaptent aux stratégies nationales sur l'hydrogène. Celles-ci diffèrent selon les positions de départ des pays, leur mix électrique, leurs ressources en énergie renouvelable, leur situation géographique, mais aussi leurs

23. O.Winter, « RWE and ArcelorMittal Intend to Jointly Build and Operate Offshore Wind Farms and Hydrogen Facilities, for Low-Emissions Steelmaking », RWE AG, 22 juin 2022, disponible sur : www.rwe.com

ambitions, par exemple les capacités d'électrolyse et les soutiens financiers publics annoncés.

Grâce à leur mix très peu carboné (complètement décarboné dans le cas de la Suède), l'utilisation de l'électricité du réseau pour produire de l'hydrogène permet à la Suède et à la France des réductions importantes d'émissions de CO₂ dès aujourd'hui, alors que ce n'est pas le cas en Allemagne ou aux Pays-Bas.

En plus de l'hydrogène produit localement, les stratégies de l'Allemagne et des Pays-Bas prévoient des importations élevées d'hydrogène ou de produits dérivés, ce qui n'est pas le cas de la France et de la Suède. Dans le cas de l'Allemagne, cette stratégie est motivée par les besoins colossaux du marché qui excèdent les possibilités de production du pays et par les opportunités que les liens avec les pays exportateurs permettent de développer pour l'exportation d'équipement. Dans le cas des Pays-Bas, cette stratégie est principalement motivée par la volonté du gouvernement, de l'industrie et des ports de transformer le pays en hub européen et porte d'entrée de l'hydrogène international, et ainsi de conserver son rôle actuel dans le commerce international et le transit d'énergie en Europe. Grâce à son infrastructure gazière redondante, les Pays-Bas sont en mesure de se doter d'un réseau hydrogène national dès 2026 – c'est une position unique en Europe. Ils seront en mesure d'importer de l'hydrogène propre (sous forme d'ammoniac) dès 2025 (4 Mt/an d'équivalent hydrogène en 2030 annoncés à Rotterdam).

Une autre stratégie commune aux sidérurgistes européens est le développement de clusters industriels décarbonés en partenariat avec des industriels d'autres secteurs. Les pôles d'activité industrielle et de production d'acier ont toujours existé, mais les sidérurgistes s'associent désormais à d'autres industriels à forte intensité en carbone dans le but de partager le financement, la recherche et les coûts, ainsi que les infrastructures. L'accès et le partage intersectoriel des réseaux d'infrastructures – tels que les futurs réseaux d'hydrogène et les réseaux d'électricité renouvelable – sont essentiels pour que l'industrie sidérurgique et d'autres industries à forte intensité en carbone réussissent à atteindre leurs objectifs de réduction des émissions.

Afin de réduire leurs émissions et d'optimiser la circularité de leurs opérations, les sidérurgistes augmentent l'utilisation du *scrap* dans la production d'acier et nouent des partenariats avec leurs grands clients (constructeurs automobiles) afin d'optimiser la récupération des ferrailles. Cette stratégie réduit les besoins en DRI des fours électriques, et donc les besoins en hydrogène. Selon Sandbag, l'utilisation optimisée de *scrap* en Europe permettrait de diminuer les besoins en hydrogène (et ceux en

électricité renouvelable) de près de moitié d'ici 2030²⁴. Aujourd'hui, la voie BF-BOF utilise environ 20 % de *scrap* comme matière première. Les nouveaux fours à arc électrique vont pouvoir utiliser des proportions plus importantes. Cette stratégie est poursuivie, entre autres, par Salzgitter (qui va passer de 2 Mt/an de *scrap* utilisé aujourd'hui à 3 Mt/an), par ArcelorMittal sur ses sites européens et français notamment (ArcelorMittal a récemment acquis plusieurs usines de recyclage de ferraille), par TKS à Duisbourg (TKS est en train de construire une unité de traitement des ferrailles à Duisbourg). Ces stratégies requièrent une réorganisation des flux de *scrap* en Europe (aujourd'hui environ 20 Mt/an sont exportées hors UE) et une restructuration de la filière de recyclage, avec des enjeux de qualité et de traçabilité.

La réduction des besoins en DRI a l'avantage corollaire de réduire les besoins en minerai de fer de haute qualité (pellets et fines de qualité DR, à teneur en fer de 67-68 %) nécessaires au fonctionnement des nouvelles unités DRI. En effet, si les procédés DRI modernes sont très flexibles en termes de combustibles, ils sont moins tolérants que les hauts-fourneaux en termes de qualité de minerai de fer et requièrent actuellement des minerais de qualité supérieure. Des recherches sont menées afin d'essayer d'autres matériaux. Ces pellets de qualité DR se négocient avec une prime de prix sur le marché international et pourraient devenir un produit rare. Le marché international du minerai de fer est très concentré (l'Australie représente plus de 50 % des exportations mondiales), et celui des pellets de qualité DR l'est encore plus (38 Mt échangées en 2020, principalement exportées du Brésil, de Bahrain, du Canada et de la Suède).²⁵ Le marché international pourrait atteindre 81 Mt en 2030, selon les estimations de décembre 2021 de l'International Iron & Metallics Association (IMMA)²⁶. La demande en pellets DR des nouvelles unités de DRI, construites principalement en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, pourrait s'élever à environ 30 Mt en 2030 et l'offre pourrait se tendre, à la fois pour des raisons de volume, mais aussi de qualité. La sécurisation des besoins en pellets de qualité DR en partenariat avec les grandes compagnies minières de minerai fait donc partie intégrante de la stratégie de décarbonation des producteurs d'acier européens. Dans le cadre du projet SALCOS, Salzgitter étudie les questions d'approvisionnement, de logistique et de certification des pellets DR avec Rio Tinto et a également signé un accord de coopération technologique avec LKAB²⁷, qui produit des pellets

24. R. Su et A. Assous, « Starting From Scrap – The Key Role of Circular Steel in Meeting Climate Goals », *op. cit.*

25. *DRI Update*, Rapport de la Sponge Iron Manufacturers Association (SIMA), Mai 2021, disponible sur : www.spongeironindia.com

26. H Forster, « High-Grade Iron Ore, Metallics in Focus to Enable DRI, Low-Emissions », *Hellenic shipping news*, 9 juin 2022, disponible sur : www.spglobal.com

27. « LKAB and Salzgitter Group Forge Technical Cooperation Agreement », 3 juin 2022, disponible sur : www.lkab.com

de qualité DR (mais envisage de ne produire que du DRI/HBI d'ici 2045)²⁸. ArcelorMittal, déjà un producteur majeur de minerai de fer (58 Mt/an), va investir 205 millions de dollars canadiens dans son usine de pellets de Port-Cartier au Canada, permettant à cette installation de convertir la totalité de sa production annuelle (10 Mt/an) en pellets de qualité DR d'ici fin 2025²⁹. Ces pellets alimenteront les unités de DRI d'ArcelorMittal au Canada et en Europe. D'autres voies technologiques sont suivies pour permettre d'utiliser des gammes plus larges de pellets (e.g. le projet de TKS de « haut-fourneau 2.0 », le projet pilote HYFOR³⁰, *Hydrogen-based Fine Iron Ore Direct Reduction*, de Primetals Technologies et Voestalpine).

Par ailleurs, la voie DRI-EAF permet de dissocier plus facilement la production d'acier que la voie BF-BOF. Le DRI ne peut pas être stocké, mais le compactage en HBI permet un stockage à long terme et un transport sur de longues distances, ce qui ouvre la voie à de nouvelles stratégies opérationnelles. Ainsi des projets de DRI/HBI peuvent alimenter des fours électriques partout en Europe. La prise de contrôle à hauteur de 80 % par ArcelorMittal de l'unité de DRI/HBI de VoestAlpine à Corpus Christi au Texas (2 Mt/an de HBI, actuellement) constitue un investissement stratégique du sidérurgiste. L'unité est une installation autonome – sans production d'acier sur place, qui alimente des fours à arc électrique aux États-Unis, et bientôt dans l'UE (les projets de VoestAlpine, entre autres). À l'avenir, le DRI/HBI, produit avec de l'hydrogène renouvelable, pourrait être produit à côté des électrolyseurs et non des aciéries et devenir un produit commercialisé à l'échelle mondiale³¹. Les chaînes de valeur des producteurs d'acier européens (et américains) pourraient être bouleversées avec le déploiement de l'hydrogène renouvelable dans les pays dotés à la fois de ressources en énergie renouvelable gigantesques et à bon marché et de ressources en minerai de fer (e.g. l'Australie, un producteur/exportateur potentiel majeur d'hydrogène et le premier exportateur mondial de minerai, et le Brésil, le deuxième producteur de minerai au monde et également un producteur potentiel majeur d'hydrogène vert). La compagnie minière australienne Fortescue Metal Group (FMG) (200 Mt/an de minerai) s'est engagée dans cette voie et entend transformer sa production de minerai de fer de haute qualité de la région de Pilbara, la principale région de production du minerai en Australie Occidentale, en plaque tournante pour la production de DRI à base d'hydrogène renouvelable (voire de production d'acier vert).

28. H Forster, « High-Grade Iron Ore, Metallics in Focus to Enable DRI, Low-Emissions », *op. cit.*

29. « 1Q 2022 Investor Roadshow », Arcelor Mittal, mai 2022, disponible sur : <https://minedocs.com>

30. Prime Metals, « Zero-Carbon HYFOR Direct-Reduction Pilot Plant Starts Operation », *Metal Magazine*, 24 juin 2021, disponible sur : <https://magazine.primetals.com>

31. R.Parkers, « Hydrogen-Derived Sponge Iron Could Become a Globally Traded Commodity: ETC Chair », *Recharge News*, 29 juin 2022, disponible sur : www.rechargenews.com

Conclusion

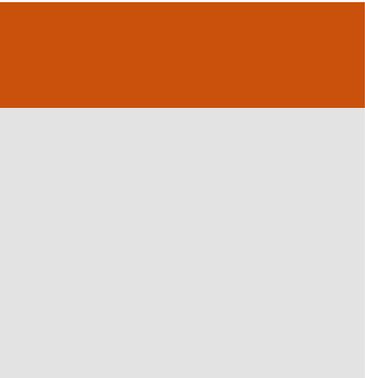
La transformation de l'industrie sidérurgique européenne s'est accélérée depuis 2022, sous l'impulsion de la réglementation européenne, de la demande en acier vert des grands industriels, de la mise en place de soutiens financiers publics et de la hausse du prix des énergies et du carbone. La voie technologique innovante H2-DRI-EAF est la stratégie privilégiée des sidérurgistes européens. Elle concerne maintenant des projets qui pourraient remplacer un tiers de la production d'acier primaire européenne d'ici 2030. Cette voie technologique attire de nouveaux acteurs (H2 Green Steel, GravitHy) dans un secteur jusqu'alors dominé par les grands groupes sidérurgiques. Cette transformation en profondeur positionne l'Europe en tête de file de la décarbonation de la production d'acier mondiale et le secteur en précurseur des politiques de décarbonation des industries difficiles à décarboner.

Si la voie H2-DRI-EAF est la stratégie privilégiée des sidérurgistes européens, l'analyse des stratégies de cinq sidérurgistes majeurs en Europe du Nord montre qu'il convient de nuancer cette conclusion :

- Certains producteurs d'acier font évoluer rapidement – d'ici 2030/2033 – l'ensemble de leur production vers cette voie (SAAB, Salzgitter, et TSN, bien que, pour ce dernier, la date de fermeture du deuxième haut-fourneau ne soit pas encore fixée). Ces stratégies devancent l'effort de décarbonation demandé au secteur. Elles permettent des réductions d'émissions de près de 95 % dès 2030/2033 par rapport à la situation actuelle (sous réserve que l'électricité et l'hydrogène renouvelables soient disponibles en quantité suffisante et à des coûts acceptables). Ces producteurs ambitionnent de devenir des leaders technologiques de cette voie et de se placer en première position sur le marché naissant – mais en pleine expansion – de l'acier vert. Ils visent également à s'affranchir du risque de volatilité et de l'incertitude pesant sur le prix des énergies et matières premières, et donc sur leurs coûts d'exploitation, ainsi que de la contrainte du prix du carbone avant que les quotas gratuits ne soient totalement éliminés.
- D'autres producteurs poursuivent en parallèle les deux grandes voies technologiques de décarbonation (ArcelorMittal/TKS) afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2045/2050. Ils vont convertir une partie de leur production au H2-DRI-EAF d'ici 2030, permettant déjà de réaliser des réductions d'émissions de 40 % d'ici 2030 par rapport à la situation actuelle et d'alimenter leurs clients en acier vert, tout en poursuivant en parallèle les efforts de R&I sur les technologies alternatives au DRI-EAF, et en adaptant régulièrement leur stratégie à l'évolution des

conditions de marché et des réglementations. Cette stratégie permet d'optimiser le coût de la transformation en fonction de la durée de vie des hauts-fourneaux (en remplaçant ceux-ci quand ils ont atteint leur fin de vie) et de développer des synergies d'une part, entre les deux grandes voies technologiques (par exemple en capturant les gaz de haut-fourneau et en les réutilisant dans l'unité de DRI), et d'autre part entre secteurs difficiles à décarboner (par exemple en utilisant les gaz de haut-fourneau pour produire des produits chimiques de base et carburants de synthèse). Cette approche leur permet d'être des leaders technologiques. Les opérateurs des hauts-fourneaux et des DRI utilisant le gaz naturel/charbon, construits récemment dans le monde, explorent d'autres solutions (CCUS, injection d'hydrogène et de HBI dans le haut-fourneau, etc.). De nouvelles voies technologiques pourraient se développer à l'avenir. La maîtrise d'une gamme de technologies de décarbonation de l'acier constitue un atout majeur pour l'Europe.

Ces transformations sont accompagnées de partenariats avec leurs grands clients visant à accroître la circularité des opérations tout au long de la chaîne de valeur (en particulier l'augmentation de l'utilisation des ferrailles) et à réduire les coûts et les émissions. L'année 2022 a été une année charnière au cours de laquelle de conditions nécessaires à la transformation de l'industrie sidérurgique se sont mises en place. Mais un défi majeur demeure. Avec environ 40 Mt/an de DRI potentiellement produit en Europe en 2030, sécuriser l'approvisionnement énergétique constitue un réel défi financier et industriel. Plus que jamais, l'accélération et le renforcement du déploiement de toutes les solutions de production d'électricité bas carbone est indispensable.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org