

La décarbonation de la filière sidérurgique : les enjeux du défi de l'« acier vert »

Par Jean-Pierre BIRAT

Fondateur et président de IF Steelman

La sidérurgie, qui est à l'origine dans le monde de 7 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, est confrontée au défi de réduire ses émissions de 55 % en 2030 et d'atteindre la neutralité carbone, le « Net Zéro », d'ici à 2050. Comme l'acier restera longtemps nécessaire à la société, des solutions en rupture sont à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs très ambitieux. La R&D a été très active depuis trente ans pour les décrire et les expérimenter jusqu'à atteindre des niveaux élevés de maturité technologique (TRL – Technology Readiness Level). Si elles ne sont pas encore complètement mûres, c'est que le *business model* nécessaire pour les financer reste élué. Une des solutions est la réduction directe du minerai de fer à l'hydrogène vert en substitution à la réduction-fusion au carbone dans les hauts fourneaux. Dans cet article, nous faisons le point sur les voies de rupture envisagées en insistant sur l'hydrogène : en France, des projets très avancés sont en cours chez ArcelorMittal. De même, dans la « Grande région Sarlorlux », une production d'hydrogène est en projet sur le territoire français avant d'être injectée dans les hauts fourneaux sarrois.

Introduction

La sidérurgie est confrontée à un énorme défi, celui de ramener à zéro ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici à 2050, ce que l'on appelle l'objectif « Net Zéro » ou la neutralité carbone, que la Commission européenne a fixé pour toutes les activités humaines dans son pacte vert européen (PVE) (Commission européenne, 2019).

Le défi à relever est important au regard de la taille de ce secteur économique (1 951 Mt d'acier en 2021), de l'intensité carbone de l'acier (environ 2 tCO₂/t acier) et du fait que l'acier est un matériau essentiel au fonctionnement de la société. Les émissions mondiales de GES de la sidérurgie constituent 7 % des émissions anthropiques. Il est à noter qu'il n'y a pas de fer métal natif dans la géosphère, seulement des oxydes : pour rompre la liaison fer-oxygène, une combinaison entre un haut « pouvoir réducteur » et beaucoup d'énergie est nécessaire, ce qui explique l'intensité carbone élevée de la production d'acier. Le réducteur disponible en quantité suffisante et le moins onéreux est le carbone, lequel provient soit du charbon, soit du gaz naturel (GN), soit de la biomasse, selon les lieux et les époques.

Stratégie adoptée dans la sidérurgie pour lutter contre le réchauffement climatique

La menace liée au changement climatique (CC) a été identifiée dans les années 1980 et, dès cette époque, on a cherché des parades aux émissions de GES de la sidérurgie (Birat, 1992 ; IISI, 1993 ; Ohno, 1994 ; Ohno, 1994).

Les stratégies générales mises en œuvre pour réduire les émissions de GES de la sidérurgie reposent sur cinq types de « solutions bas-carbone » :

- produire de l'acier en utilisant comme matière première de l'acier recyclé – la ferraille –, dont les besoins en énergie pour sa fusion représentent le quart de ceux nécessaires à la réduction du minerai. Néanmoins, l'acier étant recyclé à un haut niveau (supérieur à 90 %), cette filière ne dégagera de nouveaux potentiels de production que progressivement, au fur et à mesure de la libération de l'acier stocké dans l'économie, soit environ une quarantaine d'années après sa mise en service (Birat, 2021) ;
- continuer à produire de l'acier à partir de minerai de fer, mais avec des variantes :
 - en capturant les émissions de GES avant qu'elles n'atteignent l'atmosphère : par exemple, en les stockant dans des structures géologiques pérennes, comme des aquifères salins profonds

(au-delà de 800 m de profondeur). Cette technique dite de CSC (capture et stockage du CO₂) est utilisée assez largement dans le monde (Global CCS Institute, 2022).

- en remplaçant le charbon par du gaz naturel, donc du CH₄. Ici, c'est la combinaison de carbone et d'hydrogène qui sert de réducteur. Les émissions de GES sont réduites de moitié environ et peuvent descendre jusqu'au Net Zéro en recourant à un CSC.

- en remplaçant le réducteur chimique par de l'hydrogène pur ;

- en remplaçant le réducteur par les électrons du courant dans une cuve d'électrolyse. Ce principe est déjà utilisé pour produire de l'aluminium et du magnésium.

Toutes les combinaisons (linéaires) entre elles des différentes solutions évoquées ci-dessus sont possibles, soit à l'échelle d'un procédé (réduction au gaz naturel enrichi en hydrogène, injection d'hydrogène au haut fourneau), d'une usine, d'une entreprise ou même au niveau de la sidérurgie régionale ou mondiale.

Aujourd'hui, les filières sidérurgiques se répartissent en deux types principaux : la filière intégrée (70,8 %) et la filière électrique (28,9 %) ; le reste, soit 0,3 %, correspondant à des procédés en voie de disparition (World Steel Association, 2022). La première filière repose sur le minerai, avec réduction de celui-ci dans un haut fourneau (HF) par du coke et du charbon pulvérisé, la fonte qui en résulte étant décarburée dans un convertisseur utilisé pour produire de l'acier. La seconde filière est basée sur le four électrique (FE) et recourt à de la ferraille, mais aussi au procédé de réduction directe (RD), qui produit du fer dit de réduction directe (DRI) (113 Mt en 2021).

On voit donc qu'aucune production d'acier n'est assurée, *hic et nunc*, par l'une ou l'autre des solutions en rupture listées précédemment. Pour en comprendre les raisons, une analyse historique de ce qui s'est passé ces trente dernières années est nécessaire.

Le long chemin vers la sidérurgie « Net Zéro »

Entre la prise de conscience du changement climatique par la sidérurgie à la fin des années 1980 et l'injonction d'y apporter une réponse *via* la neutralité carbone universelle, plusieurs étapes ont été franchies :

- Une longue période de réflexion collective s'est déroulée au cours des années 1990. La sidérurgie a travaillé en réseau au niveau mondial sous l'égide de l'IISI – l'International Iron and Steel Institute (IISI, 1993) – et dans des laboratoires de recherche. En parallèle, se construisait une gouvernance mondiale du changement climatique sous l'égide de l'ONU, dans le cadre du protocole de Kyoto, et en lien avec l'IPCC. C'était une période exploratoire, où l'on s'interrogeait autant sur les dangers réels du changement climatique que sur les solutions techniques et politiques pour y remédier.

- Vint ensuite la période des programmes de R&D ambitieux et internationaux, laquelle correspond aux années 2000. Ont ainsi été lancés, en Europe, le programme ULCOS et, au niveau mondial, le CO₂ Breakthrough program de Worldsteel. Un jeu de solutions techniques claires en a résulté, avec des démonstrations à TRL élevés.

- La crise économique de 2008 a porté un coup d'arrêt à la poursuite de ces grands programmes et une période de latence s'est installée correspondant aux années 2010. Des programmes de R&D plus modestes ont été conduits en Europe et au Japon (COURSE50). La question sous-jacente était alors de comprendre comment financer cette transition.

- L'injonction formulée dans le pacte vert européen de 2019 a complètement changé la donne. Cette démarche était poussée par un vaste mouvement de fond de la société. L'objectif bascule alors vers une neutralité carbone à atteindre dans un calendrier ramassé⁽¹⁾.

Au début des années 2020, la sidérurgie dispose donc d'un certain nombre de technologies suffisamment mûres pour pouvoir envisager de basculer vers le Net Zéro : soit la filière Ferraille, qu'il faut continuer à développer pour répondre à l'émergence de nouvelles quantités de ferraille à traiter, notamment en installant de nouveaux fours électriques en substitution de hauts fourneaux ; mais aussi la filière intégrée avec CSC ; ou la réduction à l'hydrogène ; ou encore l'électrolyse du minerai de fer, développé en Europe sous les noms de ULCOWIN et de ΣIDERWIN et réalisé en milieu aqueux alcalin et à basse température (autour de 100°C) (Spire, 2022).

À noter que la question du financement de ces transitions n'est pas réglée, sauf à espérer des financements publics importants pour développer la R&D et les démonstrateurs, l'implication d'investisseurs privés et à laisser subsister un coût résiduel pour les utilisateurs d'acier. En outre, les parties prenantes commencent à se convaincre que le coût de l'action pour le climat est inférieur à celui de ne rien faire.

Hydrogène et sidérurgie

Après avoir été un « producteur » d'hydrogène, présent à hauteur de 60 % dans le gaz de cokerie (GDC), la sidérurgie a inversé son lien avec ce gaz au tournant des années 2020, quand la France et l'Allemagne ont décidé de le favoriser par de larges subventions octroyées dans le cadre du pacte vert. Le choix premier des gouvernements était de décarboner le réseau électrique sur la base des énergies renouvelables et du nucléaire (IEA, 2021). Mais l'hydrogène est vite apparu comme un choix complémentaire d'intérêt en permettant de compenser l'intermittence des renouvelables et la difficulté de stocker l'électricité. En outre, l'hydrogène était un réducteur « élégant » pour la sidérurgie.

Parmi la centaine de projets de technologies neutres en carbone liés à la sidérurgie (Birat, 2021), une moitié est spécifiquement consacrée à l'hydrogène. Après deux

⁽¹⁾ Réduction des émissions de 55 % en 2030 par rapport à aujourd'hui et de 100 % en 2050.

projets exploratoires, H-Iron et Circored, tournés autant vers l'hydrogène que vers les réacteurs à lit fluidisé, la piste de l'hydrogène a été explorée dans le cadre du programme européen ULCOS, puis ensuite dans des projets menés en Allemagne, en Autriche et en Suède, mais cette fois dans des réacteurs à lit fixe (*shaft*). Néanmoins, ce sont les choix politiques faits en faveur de l'hydrogène qui ont précipité l'essor de nouveaux projets, dont des investissements à caractère industriel.

Il est facile d'opérer une comparaison, en tant que réducteur, entre H₂ et CO (Patisson, 2021). H₂ est un très bon réducteur et s'avère d'action plus rapide que CO. De même, il est assez probable qu'il puisse travailler à plus basse température que le gaz naturel utilisé pour la réduction directe. Cela signifie qu'un réacteur fonctionnant à l'H₂ pur pourra être de dimensions plus compactes qu'un *shaft* classique. Il faut noter, néanmoins, que deux des trois réactions de réduction à l'H₂ sont endothermiques, contrairement au GN. Cela exige donc d'introduire les enthalpies correspondantes en amont du *shaft*, plusieurs options étant possibles pour ce faire.

Pour aller au-delà des essais en laboratoire et de modélisations telles que Reactor (Patisson, 2021), il est indispensable d'expérimenter sur des pilotes, puis sur des démonstrateurs et, enfin, sur des FOK, mais sans brûler les étapes. C'est le travail qui est en cours : par exemple, chez HYBRIT, Salzgitter ou VOEST, sur des lignes de production basées sur le procédé Energiron (Energiron, 2022). Midrex met en avant son expérience au travers d'essais conduits sur une ligne de production au Mexique (Midrex-H₂) (Midrex, 2022). Cette étape de montée progressive en TRL exige un travail long et soigné de mise au point.

Si l'on analyse les annonces faites par les sidérurgistes entre 2019 et 2022 en matière d'engagement vers l'atteinte du « Net Zéro », on y retrouve à peu près toutes les solutions évoquées dans cet article, avec des combinaisons et des variantes : fermeture de hauts fourneaux chez ArcelorMittal, SSAB, ThyssenKrupp Steel, Salzgitter et VOEST pour les remplacer par des fours de RD à l'H₂ et/ou par des fours à arc électrique (FEA, FE) ou à arc submergé (FAS), alimentés en H₂-DRI ou par de la ferraille. Les hauts fourneaux maintenus en service devraient, quant à eux, être équipés de CSC. Quand un FAS est mis en ligne, il sert de tampon entre la réduction à l'H₂ et le convertisseur (TKS Duisburg et AM Dunkerque). AM, qui a le plus d'usines en Europe, est aussi le sidérurgiste qui a annoncé la mise en service du plus grand nombre de fours de RD recourant à l'H₂ (Dunkerque, Fos, Brême, Eisenhüttenstadt, Gand, Hambourg et Asturies/Sestão). Il est à noter qu'un démonstrateur de SIDERWIN est en cours de développement chez AM à Maizières.

On remarquera, *in fine*, que les technologies déjà décrites s'attachent à réduire les émissions de GES de l'amont des usines intégrées. Or, la neutralité carbone doit, en principe, être atteinte à l'échelle globale de l'usine : on réfléchit donc à mettre au point des fours de réchauffage « Net Zéro » fonctionnant avec des brûleurs à l'hydrogène.

Le coût de ces filières a été estimé par EUROFER à au moins 13,8 G€/an d'ici à 2030 et à 8,4 G€/an jusqu'en 2050, ce qui correspondrait à un coût du CO₂ de 97 €/t en 2030 et à un coût global de 280 G€ (Eggert, 2022). Ces sommes représenteraient à la fois des dépenses d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX).

Des filières intermédiaires pour préparer la neutralité carbone

La neutralité carbone peut paraître lointaine et difficile d'accès à certains sidérurgistes. C'est pourquoi ils ont imaginé des solutions intermédiaires pour atteindre les objectifs à l'horizon 2030.

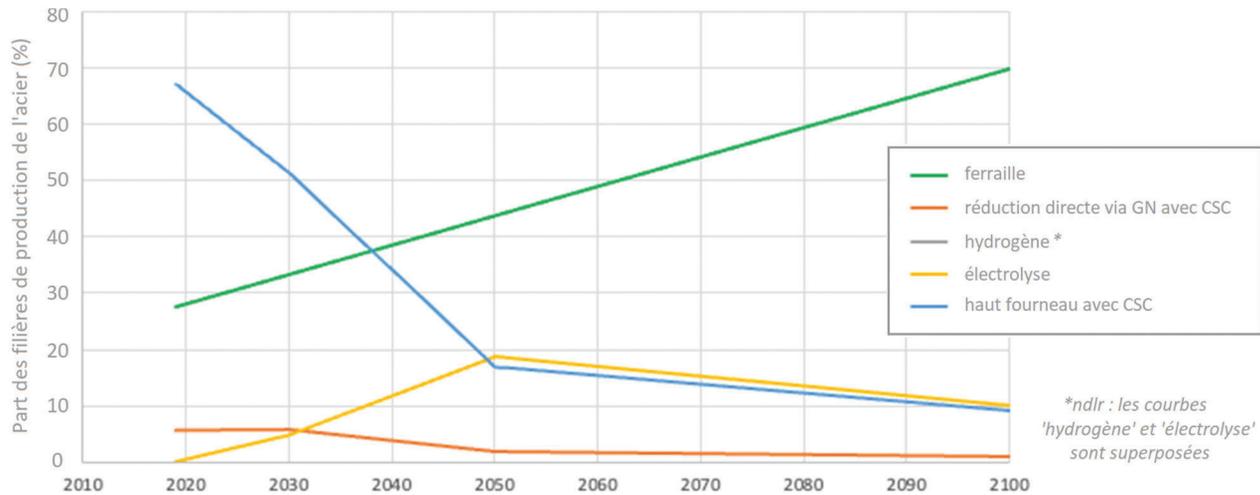
Nous avons indiqué plus haut que la réduction directe permet, en principe, de passer petit à petit du gaz naturel à l'H₂ pur. Une solution plus simple consiste à injecter du H₂ dans le haut fourneau soit sous forme de GDC, soit de H₂ pur : les émissions de CO₂ seraient ainsi réduites de 10 à 20 %.

Le projet de « Grande Region Hydrogen », porté par des industriels de Lorraine, de la Sarre et du Luxembourg, vise à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables sur les sites des anciennes centrales à charbon de Carling et de Völklingen. Cette production a vocation à irriguer les territoires avoisinants. Un de ses usages importants sera d'être injecté dans les hauts fourneaux de ROGESA, qui alimentent en fonte les aciéries de Saarstahl et de Dillinger Hütte (Creos, 2021 ; Grande Region Hydrogen, 2021). S'instaurerait ainsi une collaboration transfrontalière, la production étant assurée dans le cadre du projet HydroHub Fenne en Allemagne et par la société GazelEnergie-H2V en France, son acheminement l'étant par des réseaux de *pipelines* reconvertis au transport d'hydrogène (projet MoSaHYc) et son utilisation faite en haut fourneau dans le cadre du projet H2SYNGas.

Conclusion

La sidérurgie, en France et plus largement en Europe, mais aussi dans le monde, devra passer à une production d'acier neutre en carbone d'ici à 2050. Cela demandera des transformations majeures des usines sidérurgiques actuelles, avec très vraisemblablement des surcoûts importants de production.

Il est plus que probable que plusieurs filières, dont la réduction à l'hydrogène, travailleront en parallèle. La figure de la page suivante présente un modèle simple de prospective où sont prises en compte toutes les filières probables : montée en puissance de la filière Ferraille, des filières Hydrogène et Électrolyse, complétées par des hauts fourneaux et des fours RD au GN, et avec également un recours au CSC. La production devrait ainsi être effectivement « Net Zéro » dès 2050 (Birat, 2021).



Projection de la production d'acier en fonction des différentes filières au cours du XXI^e siècle.

Parmi les défis soulevés par une telle projection, au-delà de la transformation de la sidérurgie proprement dite, figure la nécessité d'amener l'électricité verte (ou rose) jusqu'aux électrolyseurs produisant l'hydrogène, puis ce dernier aux sidérurgistes. On parle ainsi globalement en Europe de 230 TWh/an d'hydrogène et de 5,5 Mt dans le scénario d'EUROFER très chargé en H₂ (Eggert, 2022). Selon l'IEA qui a fait une description du système énergétique mondial, cela reviendra à multiplier les capacités de l'éolien par 11 et celles du solaire par 20 et à construire de grosses capacités d'électrolyse de l'eau. Il est à noter que l'hydrogène peut aussi être importé plutôt que produit en Europe et être généré soit dans les régions riches en renouvelables, soit à proximité des usines sidérurgiques. Toutes ces options sont encore ouvertes, de même que la mise en musique de l'ensemble de ces systèmes.

Références bibliographiques

BIRAT J.-P., ANTOINE M., DUBS A., GAYE H., DE LASSAT Y., NICOLLE R. & ROTH J.-L. (1992), « Vers une sidérurgie sans carbone », *Journées sidérurgiques 1992*, 16-17 décembre 1992, et 1993, *Revue de Métallurgie* 90, pp. 411-421.

BIRAT J.-P., PATISSON F. & MIRGAUX O. (2021), "Hydrogen Steelmaking – Part 2: competition with other zero-carbon steel-making solutions and geopolitical issues", *Matériaux et Techniques* 109, 307, pp. 1-28.

COMMISSION EUROPÉENNE (2019), « Un pacte vert pour l'Europe. Notre ambition : être le premier continent neutre pour le climat », https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

CREOS-SHS, SAARBAND, SIEMENS ENERGY & STEAG (2021), "Cross-border hydrogen project in the Saar region seeking IPCEI funding", *Joint Press Release*, https://www.steag-energyservices.com/uploads/pics/210308_Press_release_Creos_Saarbahn_SHS_Siemens_Energy_STEAG_IPCEI-Six_partners_seeking_IPCEI-funding.pdf

EGGERT A. (2022), "Enabling policy framework for innovative technologies as key for steel transition", The Clean Steel Partnership, "A driver to net zero, from research to deployment of ground-breaking technologies for steel", ESTEP seminar, 1 June.

ENERGIRON (2022), "Energiron, H₂", <https://www.energiron.com/hydrogen/>

GLOBAL CCS INSTITUTE (2022), "Global status of CCS 2021, CCS accelerating to net-zero", pp. 1-79, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/11/Global-Status-of-CCS-2021-Global-CCS-Institute-1121.pdf>

GRANDE REGION HYDROGEN (2021), « Développer et optimiser une économie de l'hydrogène dans la Grande Région – Des industriels français, allemands et luxembourgeois se constituent en Groupement européen d'intérêt économique », communiqué de presse, <https://www.grtgaz.com/sites/default/files/2021-10/Communique-de-presse-grandeRegionHydrogen-25102021.pdf>

IEA (2021), "Net-Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector", https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

IISI (1993), "Carbon dioxide and the steel industry", Committee on environmental affairs and committee on technology, Brussels.

MIDREX (2022), "MIDREX H₂, Helping Steelmakers Reduce CO₂ Emissions", <https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-h2/>

OHNO Y. (1994), "Countermeasures of carbon dioxide emission in steel industry", *Proceedings of International conference on Eco-Balance*, Tsukuba, The society of non-traditional technology, p. 108.

OHNO Y. & KOMIYAMA H. (1994), "Control of CO₂ emissions in ironmaking process", *Proceedings of the 1st international congress of science and technology of ironmaking*, Sendai, ISIJ, p. 684.

PATISSON F., MIRGAUX O. & BIRAT J.-P. (2021), "Hydrogen Steelmaking – Part 1: Physical Chemistry and Process Metallurgy", *Matériaux et Techniques* 109, 303, pp. 1 et 10.

SPIRE (2022), "SIDERWIN, Development of new methodologies for Industrial CO₂-free steel production by electro-winning", <https://www.siderwin-spire.eu>

WORLD STEEL ASSOCIATION (2022), "2022 World Steel in Figures", pp. 1-31.