

## La trajectoire de décarbonation de la sidérurgie française se précise

Simon Lang\*, Frédéric Lantz\*\*, Lionel Ragot\*\*\*

@79477

**Mots-clés : industrie, prospective, stratégie, émissions de CO<sub>2</sub>, réglementation**

***La sidérurgie française est confrontée à des défis importants. La pression réglementaire pousse les entreprises à se décarboner dans un environnement dans lequel subsistent de nombreuses incertitudes. On étudie le rôle de ces incertitudes (coût du CO<sub>2</sub>, des énergies, développement des technologies) dans la détermination des stratégies optimales grâce à une approche quantitative mobilisant les options réelles. Plus les prix du CO<sub>2</sub> et de l'électricité sont volatiles, plus la capacité de projection des investisseurs est limitée, lesquels ont alors tendance à favoriser des comportements attentistes. Si plusieurs incertitudes sont en train de se lever, de nouvelles apparaissent, comme celle concernant l'approvisionnement en minerai à haute teneur en fer (que nécessite le procédé H2-DRI).***

L'industrie sidérurgique européenne, et en particulier française, est confrontée à des défis importants dans les années à venir. Une forte pression réglementaire, accompagnée de plans de soutien publics massifs, pousse les entreprises à se décarboner en investissant des dizaines de milliards d'euros dans des technologies dont la maturité était encore considérée comme incertaine récemment. En outre, la pression commerciale internationale est considérable : les surcapacités mondiales créent une concurrence difficile à surmonter pour la sidérurgie européenne peu protégée face à ses concurrents exemptés de réglementations carbone contraignantes et confrontée à l'augmentation récente des prix des énergies. Cette filière énergivore est stratégique pour l'industrie européenne, car elle fournit des produits essentiels pour des secteurs de grande importance, notamment l'automobile,

l'énergie, le transport ferroviaire et le bâtiment. Les incertitudes entourant les investissements dans de nouveaux moyens de production ont entraîné des stratégies peu ambitieuses visant à prolonger la durée de vie des actifs vieillissants par des améliorations incrémentales. Cependant, les récents plans réglementaires européens semblent avoir été perçus comme crédibles quant à leurs cibles à moyen et long terme, ce qui entraîne une multiplication des plans d'investissement, même en pleine crise énergétique. Dans cette contribution est présentée une approche modélisée qui fait le lien entre ces annonces et la forte réduction du risque perçu par les industriels.

\* EDF R&D, IFP Energies nouvelles, EconomiX, Université Paris Nanterre.

\*\* IFP Energies nouvelles – IFP School.

\*\*\* EconomiX, Université Paris Nanterre, CEPIL.

## 1. La sidérurgie européenne entre pressions internationales et politiques de décarbonation

### 1.1. Les enjeux globaux de la sidérurgie : compétition, marchés européens, effets d'échelle et chaînes de valeur

Dans le secteur sidérurgique, la filière fonte (acier primaire, environ 70 % de la production française en volume) est distinguée de la filière secondaire (acier recyclé, le tiers restant). Cette filière secondaire repose principalement sur un procédé électrique, qui fait qu'elle soulève peu d'enjeux en matière de décarbonation. Par contre, la filière fonte est depuis les années 2000 considérée comme l'un des secteurs industriels prioritaires à décarboner en raison de sa forte intensité carbone, autour de 2 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne d'acier en moyenne au niveau européen (contre 0,4 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne d'acier recyclé pour un contenu en carbone de l'électricité correspondant à la moyenne européenne actuelle). L'industrie sidérurgique représente 5 % des émissions européennes, 25 % de celles de l'industrie. De nombreux plans de soutien à sa décarbonation ont été menés, comme le plan européen ULCOS lancé en 2006, qui visait à développer des pilotes sur 10 nouvelles voies technologiques, ou encore, dès 2003, le plan international CO<sub>2</sub> Breakthrough de l'association internationale du secteur du fer et de l'acier Worldsteel. Les pouvoirs publics

ont toujours porté une attention particulière à ce secteur qui sortait d'une crise importante de surcapacité (début des années 2000) qui avait entraîné une concentration et des fermetures importantes de capacités en France et en Europe. Cette industrie se trouve aujourd'hui au cœur de chaînes de valeur stratégiques : automobile, aéronautique, énergie (éolien, nucléaire) et plus globalement des infrastructures nécessaires à la transition énergétique.

Les échanges commerciaux de l'industrie sidérurgique française ont un impact significatif sur les productions des sites industriels. Ainsi, les périodes de tension entre les États-Unis et l'Europe, consécutives aux mesures protectionnistes réciproques, ont fortement décrié depuis 2019, ce qui donne un contexte plus favorable aux investissements potentiels à réaliser. Aujourd'hui, les mesures de protection en discussion se focalisent plus sur la Chine qui est en surcapacité et cherche donc de nouveaux débouchés en cassant les prix.

### 1.2. Des actifs en fin de vie

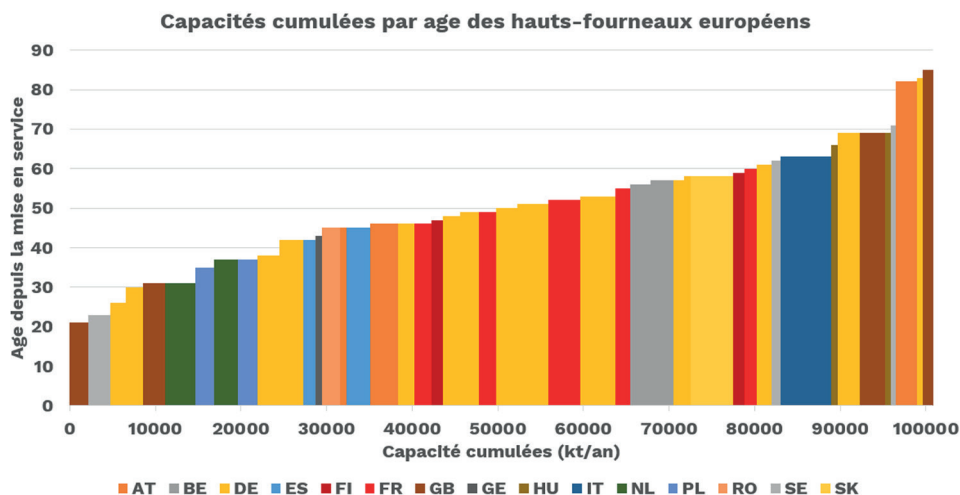
Les actifs du secteur sidérurgique européen sont très anciens pour certains et une importante vague d'investissements de renouvellement à venir occasionne une fenêtre d'action à saisir. La question de la décarbonation et de l'investissement dans de nouvelles capacités se pose avec acuité en Europe, et plus particulièrement en

	Europe (28)			France		
	2000	2019	Variation en %	2000	2019	Variation en %
Production fonte	109 Mt	96 Mt	- 12 %	14 Mt	11 Mt	- 21 %
Production recyclé	66 Mt	69 Mt	+ 5 %	8 Mt	5 Mt	- 38 %
Importations	114 Mt	163 Mt (45 extra-EU)	+ 42 %	16 Mt	15 Mt	- 5 %
Exportations	109 Mt	146 Mt (28 extra-EU)	+ 33 %	16 Mt	14 Mt	- 13 %
Consommation	169 Mt	169 Mt	/	19 Mt	14 Mt	- 27 %

**Tableau 1. Évolution entre 2000 et 2018 de la sidérurgie européenne et française**

Source : Worldsteel

Lecture : les importations et exportations sont en acier transformé, ainsi que la consommation.



**Figure 1. Âge des actifs sidérurgiques par pays européen**

Source : [Global Energy Monitor, 2023]

Europe de l'Ouest et en France où l'industrie sidérurgique a fortement décliné ces dernières années. Les décisions d'investissements lourds sont plus difficiles à prendre dans une période de baisse de la production.

Les actifs en place sont vieillissants. La moyenne de l'âge des hauts-fourneaux au niveau européen est autour de 50 ans. Les 5 hauts-fourneaux français ont entre 46 et 60 ans. Le parc de l'Europe de l'Est est plus récent, car renouvelé en partie après la chute du mur de Berlin (Figure 1). Il faut aussi bien avoir en tête qu'il est difficile de donner un âge limite maximal à un site sidérurgique qui regroupe de nombreux ateliers rénovés tous les 15-20 ans. Quoi qu'il en soit, la décennie 2020 nécessitera des investissements conséquents : prolongation de leur durée de vie à technologie donnée, renouvellement partiel d'équipements qui permettent de faire de l'efficacité énergétique ou du captage et renouvellement complet avec de nouvelles technologies moins carbonées.

### 1.3. Quelles sont les stratégies suivies par les industriels?

Les stratégies actuelles des acteurs européens se divisent principalement en trois grandes voies :

- augmenter la part d'acier recyclé (filrière secondaire). Il est facile de recycler les ferrailles en les fondant dans un EAF (*Electric Arc Furnace*), qui est un procédé électrique avec une consommation énergétique bien inférieure à la production de matière vierge (filrière primaire). En Europe, le gisement apparaît toutefois limité, sauf à diminuer de façon importante l'export massif actuel de ferrailles (6,4 Mt de ferrailles sont exportées de France dont 1 Mt hors d'Europe pour 5 Mt transformées sur place, 21 Mt de ferrailles sont exportées d'Europe hors Europe pour 69 Mt transformées sur place). Toutefois, les problématiques de qualité des ferrailles liées à la présence de polluants difficiles à oxyder (dont en premier lieu le cuivre) et les montées en exigence de la qualité des aciers ne permettent pas d'envisager une circularité totale. À l'horizon 2050, le maximum d'acier recyclé en France pourrait au mieux se situer

## La trajectoire de décarbonation de la sidérurgie française se précise

aux alentours de 70 %, soit une inversion de la proportion actuelle ;

- conserver les actifs actuels. De nombreuses modifications à la filière fonte actuelle et ses chaînes de valeur peuvent être réalisées pour la décarboner :
  - via des mesures d'efficacité énergétique. Il existe encore un potentiel pour diminuer l'intensité énergétique de la production d'acier. Par exemple, une meilleure valorisation sur le site des gaz de hauts-fourneaux s'avère être plus efficace qu'une utilisation à l'extérieur pour la production de chaleur ou d'électricité (le projet IGAR) ;
  - en utilisant de la biomasse (biomasse torréfiée, pulvérisée et du biocoke) [Mandova, 2018]. Des taux d'insertion de 10 à

80 % semblent atteignables (BIO et BIO+ dans le Tableau 2). Mais la substitution du charbon par la biomasse est d'autant plus complexe à réaliser que ce taux de remplacement est élevé ;

- en capturant les gaz à effet de serre (GES) grâce à des technologies de captage et de séquestration du carbone. Le CCS+ permet un taux de captage plus important, mais au prix d'une intensité énergétique plus élevée (CCS et CCS+ dans le Tableau 2). Néanmoins, ce captage est forcément limité au vu de la multiplicité de sources de CO<sub>2</sub> sur un site sidérurgique et des pénalités énergétiques conséquentes, mais cette solution, si les problématiques de gestion des infrastructures de transport et de stockage du CO<sub>2</sub> sont levées, pourrait représenter un abattement important ;

Technologie	Description	Intensité carbone pour 1 t d'acier	CAPEX	OPEX	CO <sub>2</sub> évité (Mt/an)
BF-BOF	Haut-fourneau classique	1,8-2			
BIO	Insertion de biomasse pulvérisée	1,5-1,8		+	~4
BIO+	Utilisation de biomasse pulvérisée et de biocoke	0,6-1,5	+	++	~5-10
CCS	CCS en utilisant la chaleur fatale disponible	1,2-1,6	++	+	~5
CCS+	CCS supplémentaire avec pénalité énergétique	0,8-1,2	+++	+++	~11
NG-DRI	Réduction à l'aide du gaz naturel	0,9-1,2	++++	++	~9
H2-DRI	Réduction à l'aide d'hydrogène	0,1-0,3	+++++	+++	~17

**Tableau 2. Caractéristiques principales des voies technologiques pour la production d'acier primaire envisagées en Europe d'ici 2035**

Source : Calculs des auteurs, présentation du Plan de transition sectorielle de l'acier par l'ADEME en juin 2023 et [Arens, 2017]

Lecture : CAPEX (dépenses d'investissements nécessaires par rapport aux dépenses assurant la pérennité d'un haut-fourneau classique) et OPEX (dépenses de fonctionnement), le nombre de + indique l'ampleur des dépenses. Le CAPEX pour l'H2-DRI n'intègre pas les électrolyseurs, l'hydrogène n'est pas produit sur site. Le CO<sub>2</sub> évité correspond aux émissions annuelles évitées pour une transition de l'intégralité du parc.

- investir dans de nouveaux actifs :

- pour remplacer le charbon par du gaz naturel comme agent réducteur (NG-DRI dans le Tableau 2). Il s'agit d'un procédé de réduction directe du minerai de fer (cf. Encadré 1). Ce qui nécessite de nouveaux actifs, dont la maturité technologique est bonne, car déjà répandus dans des zones géographiques avec un accès facilité à cette ressource ;
- pour remplacer le charbon par de l'hydrogène (H<sub>2</sub>-DRI). Dans ce cas, deux stratégies sont envisageables, un remplacement direct ou une adaptation à terme d'un actif au gaz ;

- pour passer à l'électrolyse du fer, qui utiliserait directement l'électricité pour réduire le fer (EW). Cette technologie est encore en développement, mais bénéficierait de nombreux avantages, car elle est très flexible pour le système électrique et valorise du minerai de fer de faible qualité.

La décarbonation de la sidérurgie française ne pourra pas être réalisée à l'aide d'une seule de ces stratégies, mais nécessite à la fois des changements de technologies, du recyclage, une évolution à la baisse de la demande et une décarbonation en parallèle du mix énergétique. Il est possible de tracer différentes stratégies de décarbonation qui combinent ces options technologiques. En prenant en compte une évolution du prix du carbone et des énergies, des hypothèses

### Encadré 1. COMMENT PRODUIT-ON DE L'ACIER ?

Le minerai utilisé contient typiquement 60-65 % de fer, sous sa forme oxydée (FeO). Les procédés, mis en place à la fin du xix<sup>e</sup> siècle et améliorés dans la deuxième moitié du xx<sup>e</sup>, sur lesquels repose la production actuelle, consistent en une étape de réduction-fusion, suivie d'un affinage. Tout d'abord aggloméré, le minerai est placé dans un haut-fourneau, positionné en couches alternées avec du coke (du charbon pyrolysé). Plusieurs opérations ont alors lieu simultanément : le coke en brûlant va dégager du monoxyde de carbone (CO) et chauffer l'ensemble. La réaction chimique, de réduction du fer, a alors lieu :  $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ . Une partie du charbon chargera en carbone le fer, pour créer de la fonte. Ce taux de carbone, régissant en grande partie les caractéristiques du métal obtenu, sera ajusté dans un convertisseur à oxygène pour donner de l'acier. Il sera ensuite coulé, laminé et usiné.

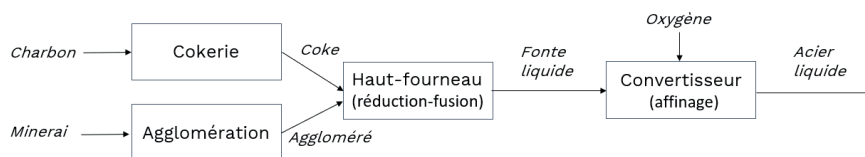


Figure 2. Ensemble des opérations réalisées sur un site sidérurgique intégré avec haut-fourneau classique (BF-BOF)

L'ensemble de ces opérations sont aujourd'hui réalisées sur des sites intégrés imbriquant fortement les flux de matières et les flux énergétiques. Remplacer le charbon et le coke se révèle particulièrement difficile, car ils sont au cœur du procédé et ont des apports, non seulement thermiques, mais également structuraux, chimiques et d'apport en carbone.

Le défi de la réduction directe est d'opérer l'étape chimique de réduction de l'acier sans fusion et affinage :  $\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ . Il faut pour cela utiliser un four à arc pour fondre et affiner simultanément (ajuster du contenu en carbone et réaliser des nuances avec des éléments d'addition). Si l'hydrogène est un meilleur réducteur que le monoxyde de carbone (plus basse température et plus rapide), il nécessite de repenser et reconstruire une majeure partie des infrastructures.

de levées d'incertitudes de développement technologique, et la gestion du remplacement d'actifs en fin de vie, les acteurs sidérurgiques tracent depuis plusieurs années des voies combinant ces options pour se décarboner.

### 2. Quelles sont les difficultés à surmonter pour permettre les investissements nécessaires?

#### 2.1. Les incertitudes réglementaires

Les incertitudes réglementaires sont au cœur des processus décisionnels des industriels. En effet, avant 2020, celles-ci étaient encore nombreuses, en particulier sur l'ampleur de la réforme du système d'échange de quotas (EU-ETS) et sur le planning de la fin des allocations gratuites. À plus long terme, c'est la volonté politique de respecter les objectifs annoncés qui était interrogée [Lofgren, 2021]. Ces incertitudes ont conduit les acteurs de la sidérurgie européenne à multiplier les feuilles de route, sans annonce d'investissement. Les nombreuses interrogations sur le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières sont venues s'ajouter, élargissant les questionnements dans les prises de décision. Alors que les actifs sidérurgiques ont de longues durées de vie et des flexibilités opérationnelles limitées (verrouillage technologique), les décisions d'investissements ont été repoussées.

#### 2.2. Les risques de verrouillage : l'apport des options réelles

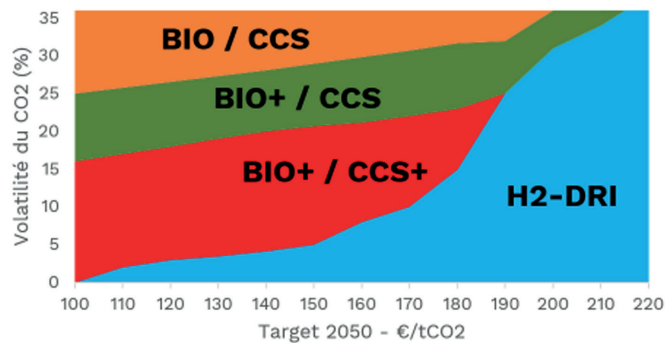
Conserver les actifs en place, prolonger leur durée de vie et les adapter petit à petit à des contraintes carbone de plus en plus prégnantes a été la solution adaptée dans cet environnement incertain. Continuer dans cette voie incrémentale nécessite de mobiliser biomasse et captage, deux solutions qui restent toutefois soumises à des incertitudes technologiques qui leur sont propres : disponibilité de biomasse, intégration du captage du carbone (*Carbon Capture and Storage*, CCS, ou *Carbon Capture and Utilization*, CCU) dans les structures industrielles et dépendance au succès des infrastructures associées (transport et traitement du CO<sub>2</sub>) qui devraient *a priori* être mutualisées avec d'autres sites industriels (cimenteries, raffineries...). Atteindre des réductions de gaz à effet de serre conséquentes en combinant biomasse et captage est complexe et potentiellement coûteux, sans pour autant échapper au couperet de l'obsolescence de certains équipements centraux, comme les hauts-fourneaux.

Deux risques de verrouillage se posent dans la transition de la sidérurgie :

- investir dans des solutions incrémentales avec un abattement de 30 à 60 % des GES peut aboutir à un verrouillage ou conduire à des coûts échoués importants si les incertitudes se lèvent trop tard ;

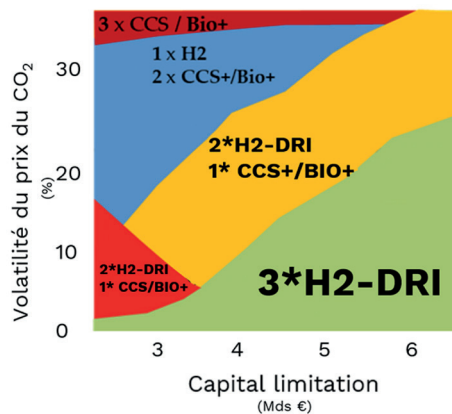
#### Encadré 2. L'INTÉRÊT D'UNE APPROCHE PAR OPTIONS RÉELLES

Dans un environnement incertain, l'évaluation classique bénéfices/coûts est critiquée. Elle ne valorise pas certaines flexibilités qui permettent de s'adapter à un environnement incertain notamment pour les investissements irréversibles. L'approche par options réelles valorise les options permises par une technologie (flexibilités opérationnelles, investissements progressifs, prolongement de la durée de vie...) dans cette balance bénéfice/coût, via une évaluation stochastique des valeurs ajoutées associées à des prises de décision dans de multiples réalisations d'un environnement incertain. Le modèle développé utilise la méthode de Monte-Carlo pour simuler un grand nombre de potentielles réalisations d'environnement incertain (prix des commodités notamment). Ensuite, pour chaque réalisation, et de façon récursive de 2020 à 2050, la décision optimale d'investissement, qui minimise le risque, est modélisée. Il est ensuite possible de créer des « scénarios moyens », ou de suivre une réalisation particulière.



**Figure 3a. Parc sidérurgique français en 2050 selon le niveau et la volatilité du prix du carbone, sans contrainte de financement**

Source : [Lang et Lantz, 2023]



**Figure 3b. Parc sidérurgique français en 2050 selon le niveau et la volatilité du prix du carbone, avec contrainte de financement**

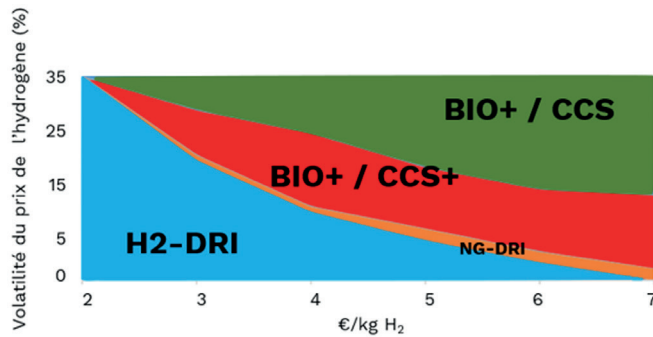
Source : [Lang et Lantz, 2023]

- investir dans une réduction directe au gaz permet une transition rapide lorsque des actifs doivent être renouvelés. Par rapport à un investissement direct dans des installations à hydrogène, ce choix peut conduire à un verrouillage s'il se révèle difficile du point de vue technologique et onéreux de basculer du gaz vers l'hydrogène. L'augmentation de la part d'hydrogène selon sa prise en compte à la conception peut, en plus de potentiellement sursolliciter certains équipements, modifier les équilibres thermiques et ralentir la réaction.

On peut étudier le rôle de ces risques grâce à une approche quantitative mobilisant les options réelles [Lang et Lantz, 2023]. Pour cela, il faut représenter l'environnement de la sidérurgie via les variables stochastiques (coût du CO<sub>2</sub>, des énergies, développement des technologies) qui le caractérisent, puis construire les trajectoires optimales qui diminuent le risque d'être exposé à des pertes importantes. En intégrant la plupart des contraintes évoquées précédemment, comme l'âge des actifs ou la possibilité d'étaler des investissements par étape, on peut analyser, en l'appliquant au cas français, l'impact sur les choix des



## La trajectoire de décarbonation de la sidérurgie française se précise



**Figure 4. Parc sidérurgique 2050 en France selon la volatilité et le prix de l'hydrogène électrolytique, sans contrainte de financement**

Source : [Lang et Lantz, 2023]

sidérurgistes des prix du CO<sub>2</sub> et de l'électricité et le volume de capital disponible sur la période. Plus les prix du CO<sub>2</sub> et de l'électricité sont volatils, plus la capacité de projection des investisseurs est limitée, lesquels ont alors tendance à favoriser des comportements attentistes orientés autour de la diminution de l'exposition au risque. La quantité de capital disponible sur la période limite quant à elle la combinaison d'options technologiques qu'il est possible de réaliser sur la période d'intérêt, 2020-2050. Les figures suivantes mettent en exergue l'importance de ces trois variables clés dans la décision des sidérurgistes. L'ensemble des hypothèses sur les données est détaillé dans [Lang et Lantz, 2023].

La Figure 3 donne les actifs en place en 2050 en fonction du niveau et de la volatilité du prix du CO<sub>2</sub>, suivant que les investisseurs ont été confrontés (Figure 3b) ou non (Figure 3a) à une contrainte de financement. En l'absence de contrainte financière, on représente le choix pour un unique haut-fourneau, tandis que la contrainte financière est prise en compte lorsqu'il s'agit d'un parc de 3 hauts-fourneaux (ce qui correspond au site de Dunkerque) et une cible du prix du CO<sub>2</sub> de 200 €/tCO<sub>2</sub>.

Sans contrainte de financement (Figure 3a), pour une même anticipation du prix du carbone en 2050 de 180 €/tCO<sub>2</sub>, une volatilité faible de ce prix (moins de 10 %, signe d'une confiance dans

les régulations carbone) déclenche un investissement très bas carbone (H2-DRI). Au-delà de 10 %, des voies incrémentales sont préférées, avec des technologies de moins en moins coûteuses au fur et à mesure de l'augmentation de la volatilité, au détriment du respect des objectifs de décarbonation. Cette figure met également bien en évidence la sensibilité des décisions à la volatilité. À 16 % de volatilité, le prix de bascule (*break-even*) entre BIO+/CCS et BIO+/CCS+ est d'environ 105 €, alors qu'à 20 %, il passe à 160 €. Il faut également noter que la bascule vers la technologie H2-DRI est très sensible à la volatilité pour un prix cible inférieur à 170 € (premier régime) et l'est beaucoup moins pour un prix supérieur (deuxième régime).

Avec des contraintes de financement (Figure 3b) sur la totalité de la période 2020-2050, on observe une stratégie de diversification dans la gestion du portefeuille de 3 actifs. Il faut avoir en tête que ce graphique donne simplement la nature des actifs en 2050, sans illustrer la diversité des stratégies pouvant conduire à cette même situation finale. Sans contrainte, pour ce prix cible de 200 €/tCO<sub>2</sub>, le choix optimal est 3 hauts-fourneaux H2-DRI pour une volatilité pouvant aller jusqu'à 30 % (Figure 3a) alors qu'avec contrainte financière cette volatilité ne doit pas dépasser 2 % avec un investissement maximal de 2,5 milliards d'euros (Md€) et 24 % avec 6 Md€. Dans le premier cas (2 % de volatilité et 2,5 Md€), il



s'agit d'un investissement direct dans 3 hauts-fourneaux H2-DRI entre 2025 et 2037, alors que dans le deuxième cas (24 % et 6 Md€), 2 hauts-fourneaux voient leur durée de vie prolongée avec de la biomasse et du CCS avant de passer à l'hydrogène en 2045, tandis que le premier est remplacé par un NG-DRI en 2028, qui basculera à l'hydrogène en 2041.

La Figure 4 donne l'état du parc en 2050 (sans contrainte de financement), selon les niveaux et la volatilité du prix de l'hydrogène électrolytique, toujours avec une cible de 200 €/tCO<sub>2</sub>. Pour cadrer les ordres de grandeur sur ce prix, l'AIE dans son scénario *Sustainable Development* [AIE, 2020] retient un prix de l'hydrogène électrolytique autour de 2,5 € en 2050. La solution hydrogène n'est mise en place en 2050 que sous des conditions strictes de visibilité du prix de cette ressource. Ainsi une cible à 2 €/kg d'hydrogène permet leur construction, malgré une très forte volatilité (35 %), alors qu'au-dessus de 4 €/kg, la volatilité devra être inférieure à 12 % pour que les investisseurs se lancent dans cette technologie. Dans des conditions plus défavorables, la solution NG-DRI peut être mise en place en 2050, mais ce sont surtout les solutions BIO+ qui sont considérées, soit avec du CCS+ et un approvisionnement favorable en électricité, ou juste du CCS, si le couple volatilité/niveau de celle-ci est trop important.

La Figure 5 présente l'effet croisé des volatilités des prix de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub> pour des prix cibles respectifs de 3 €/kg et de 200 €/tCO<sub>2</sub>. L'intérêt de cette analyse en volatilités croisées est de mettre en évidence que la prise en compte simultanée des deux incertitudes ne conduit pas à une simple juxtaposition des résultats des Figures 3a et 4. En effet, la solution NG-DRI est absente de la Figure 3a et reste marginale dans la Figure 4, alors qu'elle prend une place importante ici. La technologie NG-DRI présente un profil financier, énergétique et d'émissions, favorable à des contextes très incertains.

Il faut également souligner que la crise des prix de l'énergie a semé le doute sur les adaptations nécessaires : la réduction au gaz naturel, technologie de transition par excellence, voit sa place remise en question. Les incertitudes sur le prix du gaz vont-elles diminuer la confiance des acteurs dans cette voie à court terme et ainsi ralentir la transition, ou au contraire accélérer vers une voie plus directe de décarbonation profonde, malgré les potentielles tensions sur l'approvisionnement en hydrogène [Cornot, 2023]?

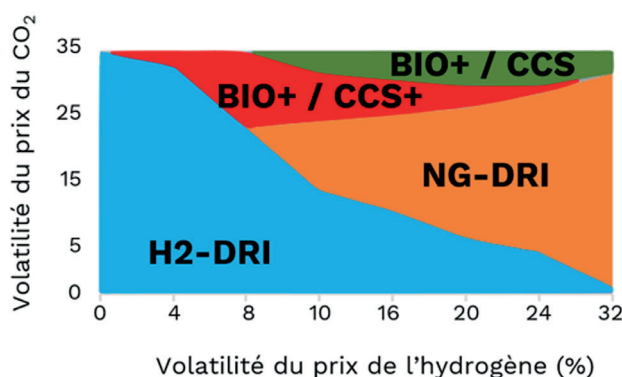


Figure 5. Parc sidérurgique 2050 selon les volatilités des prix de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>

Source : [Lang et Lantz, 2023]

### 2.3. La réduction des incertitudes se retrouve dans la multiplication des annonces de projets

Une réforme du marché de l'ETS et les plans européens (RepowerEU et Fit for 55 %) renforcent la confiance dans un marché du carbone avec une cible haute du prix et peu volatile, ce qui favorise les investissements de rupture, en faveur de l'hydrogène. Ceci, d'autant plus que la période s'accompagne d'aides à l'investissement qui permettent de limiter le poids sur la dette des entreprises.

Les avancées récentes sur la réforme du système ETS, qui donnent aujourd'hui un calendrier clair de la fin des allocations gratuites (qui s'étalera de 2026 à 2034, suivant les secteurs), conduisent à des anticipations de cible de prix carbone à un niveau relativement élevé et la Market Stability Reserve de 2019 a permis de stabiliser le cours du CO<sub>2</sub> même en cas de crise.

Toujours pour réduire l'incertitude sur le prix du carbone, en Allemagne, des systèmes type contrats pour différence, *Contract for Difference* (CfD), ont été examinés. L'État s'engagerait à garantir un prix du carbone minimum à ses industriels, dans le sens où il garantit la compétitivité des solutions bas carbone par rapport aux solutions plus classiques. Ce plan serait financé à hauteur de 50 Md€ et attribué aux enchères à tous les industriels souhaitant se décarboner. Ce type de contrat est envisagé dans de nombreux pays européens. En France, sans mobiliser les CfD, la Commission européenne a autorisé une subvention de 850 M€ à Arcelor pour ses investissements bas carbone, participant à rendre le pays très attractif pour cette nouvelle sidérurgie [Energy Transition Commission, 2023].

Le plan RepowerEU a renforcé les ambitions européennes de production d'hydrogène et limite les craintes liées aux contraintes d'approvisionnement. Ce plan soutient de façon importante les projets d'H2-DRI, et renforce une stratégie industrielle européenne, en présentant la sidérurgie comme son fer de lance de l'industrie décarbonée.

Ces réductions récentes d'incertitudes n'ont pas seulement porté sur les prix du carbone et de l'hydrogène, mais également sur les technologies. Hybrit, acteur suédois très fortement soutenu par les pouvoirs publics locaux, qui avait parié dès 2016 sur la voie H2-DRI, a annoncé plusieurs succès technologiques associés [Hybrit, 2021].

Des partenariats industriels se nouent, avec un partage du risque associé. Les sidérurgistes n'ont pas nécessairement vocation à produire leur propre hydrogène. Les projets annoncés aujourd'hui associent généralement un sidérurgiste et un énergéticien qui s'engage sur une fourniture d'hydrogène, limitant les CAPEX, les risques technologiques et de couverture. Ainsi, Hybrit s'est associé avec Vattenfall, ThyssenKrupp et ArcelorMittal avec AirLiquide ou encore H2 Green Steel avec Statkraft. Ces associations prennent souvent la forme de contrat d'achat direct (*Power Purchase Agreement*, PPA). D'autres types de partenariat se nouent également sur l'aval de la chaîne de valeur avec des achats long terme d'acier vert pour les fabricants automobiles. Ils permettent de transmettre un premium, de manière efficace, le long de la chaîne de valeur, avec une moindre volatilité. À titre d'exemples, Mercedes-Benz et BMW ont des contrats avec ThyssenKrupp et Salzgitter et Volvo avec Hybrit.

Ces deux dernières années, les annonces de projets prenant la voie de l'hydrogène se sont donc succédé au niveau européen, avec notamment, en France, les projets GravitHy (à Fos), Arcelor et LibertySteel (tous les deux à Dunkerque), en Allemagne, ThyssenKrupp sur plusieurs sites, ou encore H2steel en Autriche. Avec plus de 50 % des capacités annoncées (45 Mt/an [Vogl, 2023]) d'acier bas carbone (H2-DRI) au niveau mondial, l'Europe a pris la tête de la décarbonation du secteur de la sidérurgie. Toutefois, gardons à l'esprit qu'il s'agit d'annonces et pas encore de décisions finales d'investissement (FID).

#### 2.4. Une reconfiguration potentielle des chaînes de valeur face aux contraintes en approvisionnement énergétique

Les besoins en hydrogène bas carbone pour faire basculer l'intégralité de la production sidérurgique actuelle à la réduction directe (H<sub>2</sub>-DRI) s'élèveraient à environ 360 TWh à l'échelle européenne et 36 TWh pour la France [Vogl, 2018]. Sa disponibilité et sa compétitivité (l'hydrogène pourrait représenter plus de la moitié du coût de production de l'acier) doivent donc être au rendez-vous pour permettre de développer cette filière.

Certains pays européens, dont l'Allemagne, font le pari de l'importation d'hydrogène pour décarboner leur industrie. L'Allemagne prévoit pour 2030 dans sa stratégie hydrogène (mise à jour en juillet 2023 [NWS, 2023]), qui concerne l'ensemble de son économie, 95 à 130 TWh de consommation d'hydrogène pour une capacité de production nationale de seulement 10 GW, ce qui correspond à environ un tiers de cette consommation totale. Cette stratégie peut néanmoins être questionnée en raison de la modularité des nouveaux procédés de réduction directe, qui peuvent ouvrir la voie à de nouvelles configurations des chaînes de valeur. En effet, ils permettent de séparer géographiquement les différentes étapes de production de l'acier (réduction, fusion, affinage, laminage). De plus, la performance de l'hydrogène comme réducteur autorise des installations de dimensions plus réduites (voir Encadré 1). Il paraîtrait ainsi intéressant de profiter d'une conjonction spatiale entre les gisements de minerai de fer et des gisements de production d'électricité renouvelable à grande échelle (Afrique du Sud, Australie, Maroc) [Lopez, 2023; Delvin, 2022].

Cette nouvelle séparation des opérations de production de l'acier permettrait ainsi de réaliser l'ensemble des opérations à faible valeur ajoutée (production d'électricité, d'hydrogène, exploitation des mines, et réduction du minerai de fer) dans un périmètre géographique restreint et de n'exporter que du minerai de fer pré-réduit (sous forme d'HBI, *Hot Briqueted Iron*, forme stable adaptée au transport). La sidérurgie européenne

pourrait se concentrer sur l'affinage et le recyclage des métaux. Ce nouveau commerce international réduirait les imports directs d'hydrogène, très coûteux énergétiquement, et nécessitant des infrastructures lourdes, pour les réaliser de façon indirecte via du HBI, un médium bien plus simple et bon marché à transporter.

### Conclusion

Malgré les annonces récentes en faveur de la réduction directe (H<sub>2</sub>-DRI), les grands acteurs du secteur de la sidérurgie adoptent encore des positionnements différents : certains souhaitent faire évoluer, dès 2030, une part importante de leur production vers la réduction à l'hydrogène décarboné, alors que d'autres poursuivent en parallèle plusieurs voies de décarbonation et adaptent régulièrement leur stratégie à l'évolution des conditions de marché et des réglementations. Cette différence s'explique d'abord par la gestion de la fin de vie de leurs actifs carbonés, ainsi que par leur adaptation progressive à une levée importante d'incertitudes depuis quelques années.

La construction de hauts-fourneaux à hydrogène nécessite non seulement la mise au point de nouveaux procédés et l'adaptation à de nouvelles chaînes de valeur, mais surtout des investissements conséquents et inédits pour cette industrie en Europe. De façon transitoire, les dépenses d'exploitation seront également en hausse importante (avec des prix de l'hydrogène encore élevés et un marché du carbone peu adapté aux procédés innovants), ce qui nécessitera des marchés spécifiques pouvant absorber un premium d'acier vert.

Les enjeux liés aux quantités élevées d'électricité et d'hydrogène bas carbone nécessaires avec l'adaptation en conséquence du système énergétique sont au cœur de la décarbonation de la sidérurgie. De l'hydrogène à très grande échelle et bon marché sera nécessaire pour que la transition soit possible. En son absence, des délocalisations (*a minima* de l'étape de réduction du minerai de fer) pourraient avoir lieu. L'essor des contrats d'achat direct (PPA) semble être une réponse à

ce besoin de visibilité, liant un sidérurgiste et un énergétique sur un temps long.

Si les accès compétitifs à ces énergies bas carbone et au minerai de haute qualité seront un élément important de la transition de la sidérurgie, la lisibilité des politiques publiques (européennes et nationales) de soutien à la décarbonation restera le facteur déterminant du rythme de celle-ci. La clé de voûte de cette politique est la mise en place du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) et les modifications associées du système d'échanges de quotas. La fin des allocations gratuites aux hauts-fourneaux permettra l'émergence d'un différentiel de compétitivité à l'avantage de l'acier décarboné. Le déploiement de ce dispositif ne sera pas simple, avec des questions sur son insertion dans le commerce international et notamment la prise en compte des biens contenant de l'acier. Sans oublier ses éventuels effets pervers : la substitution d'importations d'acier par des importations de biens contenant de l'acier. Ce dispositif clé peut être renforcé par des aides à l'investissement pour limiter la pression financière. Ces politiques publiques accroissent la visibilité des industriels et renforcent également leur confiance dans le soutien des gouvernements si une nouvelle crise venait à déstabiliser leur secteur en pleine transition.

Si plusieurs incertitudes sont en train de se lever, de nouvelles apparaissent, comme celle concernant l'approvisionnement en minerai à haute teneur en fer. Le procédé H<sub>2</sub>-DRI exige *a priori* des minerais à haute teneur en fer, ce qui peut créer des tensions sur cette ressource et accentuer le premium qui y est déjà associé, voire remettre en question la transition à grande échelle vers l'hydrogène.

### BIBLIOGRAPHIE

- AIE, 2020. Energy Technology Perspectives.
- Arens M., 2017. "Technological change and industrial energy efficiency: Exploring the low-carbon transformation of the German iron and steel industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 163.
- Global Energy Monitor, 2023. Global Blast Furnace Tracker.
- Cornot S., 2023. «La sidérurgie européenne se prépare pour être à la pointe de la décarbonation», Notes de l'Ifri, Ifri, janvier.
- Delvin A., 2023. "Global green steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits", *Nature Communications*, vol. 14.
- Energy Transition Commission, 2023. Unlocking the first wave of breakthrough steel investments in France.
- Hybrit, 2021. Press release, <https://www.hybritdevelopment.se/en/the-worlds-first-fossil-free-steel-ready-for-delivery/>.
- Lang S., Lantz F., 2023. "Carbon risk and green steel investments: Real Options Analysis and MonteCarlo simulations to assess decarbonization policies", AIEE 2023 Milan Proceedings.
- Lofgren A., 2021. "Brick by brick: Governing industry decarbonization in the face of uncertainty and risk", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 40.
- Lopez G., 2023. "Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry", *Energy*, vol. 273.
- Mandova H., 2018. "Possibilities for CO<sub>2</sub> emission reduction using biomass in European integrated steel plants", *Biomass and Bioenergy*, vol. 115.
- BMWK, 2023. Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie.
- Vogl V., 2018. "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking", *Journal of Cleaner Production*, vol. 203.
- Vogl V., Sanchez F., Torres Morales E., Gerres T., Lettow F., Bhaskar A., Swalec C., Mete G., Åhman M., Lehne J., Schenk S., Witecka W., Olsson O., Rootzén J., 2023. Green Steel Tracker, Version 04/2023, Stockholm, Dataset, [www.industrytransition.org/green-steel-tracker/](http://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/).

## BIOGRAPHIES

**SIMON LANG** (ISAE-SUPAERO 2020) mène une recherche doctorale en collaboration avec le laboratoire EconomiX à Paris Nanterre, l'IFPEN et EDF R&D. Sa thèse se concentre sur les défis liés à la réduction des émissions de carbone dans l'industrie manufacturière française, en prenant en compte à la fois les contraintes techniques liées au renouvellement des équipements et l'aversion des acteurs vis-à-vis du risque. Pour ce faire, il utilise des modèles de simulation de type *bottom-up* techno-explicites afin d'établir des scénarios de consommation d'énergie.

**FRÉDÉRIC LANTZ** est titulaire d'un DEA en économétrie et économie mathématique (1982) et d'un doctorat en économie (1984) – Université de Paris X-Nanterre. Il a également reçu une habilitation à diriger des recherches (2004). Il a rejoint IFP School en 1991 après une première expérience en recherche dans le domaine de l'économétrie et de la modélisation bio-économique à l'Ifremer, où il faisait partie du groupe de travail Mer du Nord pour la Commission européenne. Il enseigne l'économie de l'énergie, l'économétrie et la recherche opérationnelle pour l'énergie et l'environnement. Parallèlement, ses travaux de recherche l'ont impliqué dans le développement des outils de modélisation économique de IFP Energies nouvelles.

**LIONEL RAGOT**, agrégé des universités, est professeur à l'Université Paris Nanterre depuis 2012. Il a soutenu une thèse en économie sur les problématiques environnementales à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Il a été conseiller scientifique au Conseil d'analyse économique du Premier ministre (CAE) de 2007 à 2010 avant de rejoindre, comme conseiller scientifique, le Centre d'études prospectives et d'informations internationales (CEPII). Ses travaux de recherche portent sur la dynamique de long terme des économies et les politiques structurelles. Il s'intéresse plus particulièrement à la définition d'une croissance économique durable, qui permettrait la poursuite de la hausse du niveau de vie tout en préservant l'environnement.

### À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Le CCS et l'hydrogène bas carbone pour décarboner l'industrie française, *Richard Lavergne, Benoît Legait (n° 656, mai-juin 2021)*
- L'émergence de l'industrie européenne des batteries : vers d'incontournables dépendances, *Dominique Finon (n° 665, novembre-décembre 2022)*
- Réveil de la politique industrielle américaine et réponse européenne, *Camille Defard (n° 666, mai-juin 2023)*

À retrouver sur [www.larevuedelenergie.com](http://www.larevuedelenergie.com).