

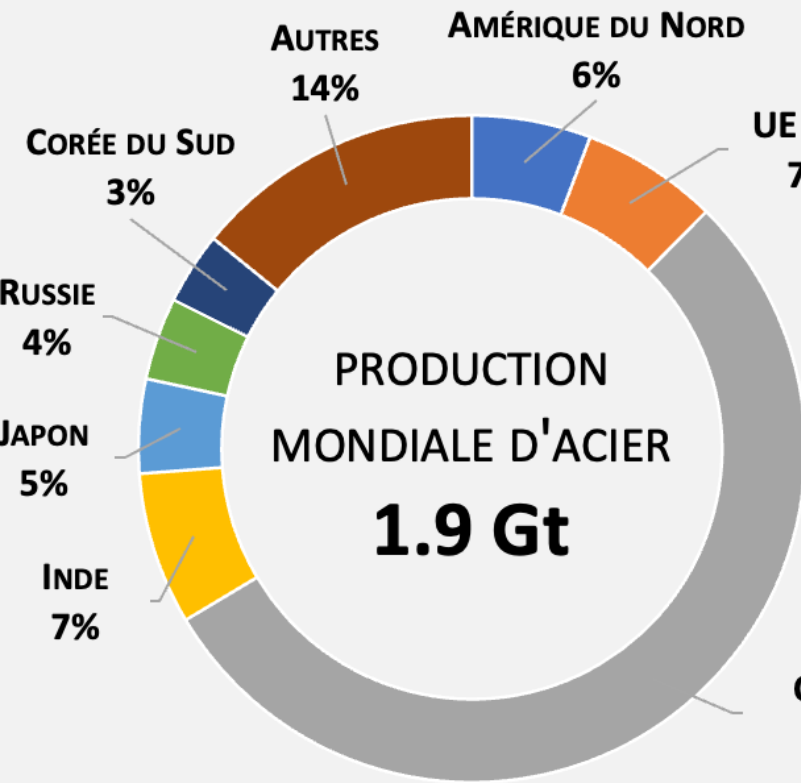
MINÉRAI DE FER

Le minerai de fer se trouve naturellement sous forme d'oxydes. C'est une ressource répartie inégalement à l'échelle de la planète. Son exploitation est très concentrée géographiquement, 5 pays pèsent pour 80% de la production mondiale.

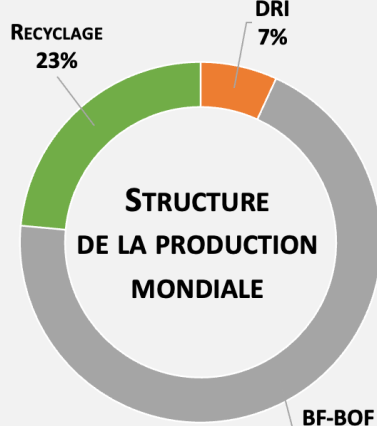
PRODUCTION D'ACIER

La production mondiale d'acier a doublé sur les 20 dernières années. Alors qu'on prévoit un ralentissement dans les pays développés, la demande connaît une forte croissance dans les pays émergents. La production, dominée par la Chine, est concentrée en Asie. Les acteurs de l'industrie de l'acier sont cependant très répartis (les 50 plus grands sidérurgistes ne représentent que 56 % de la production).

ÉTAT DES LIEUX DE L'INDUSTRIE DE L'ACIER



La production d'acier primaire est dominée par la **filière hauts fourneaux (BF-BOF)**. Ce procédé, qui consiste à réduire le minerai de fer avec du coke, est très émetteur (2,3 tCO₂/t_{acier}). Cette étude s'attache ainsi à présenter les solutions de décarbonation existantes, les entreprises qui les développent, et les dynamiques en jeu dans différentes régions du monde.



ENJEUX CLIMATIQUES

- 6% des émissions mondiales de GES soit 3,6 GtCO₂/an (scope 1 et 2) ou encore 1,9 tCO₂/t_{acier}
- Intensité énergétique : 21 GJ/t_{acier}

EN FRANCE



Production d'acier
10 Mt/an

soit 8% de la production européenne ou 0,5% de la production mondiale



Émissions
20 MtCO₂/an

soit 5% des émissions françaises ou ¼ des émissions de l'industrie



Filière hauts fourneaux
67% de la production

mais 96% des émissions

Les émissions sont donc concentrées sur 6 hauts fourneaux répartis sur 3 sites (Dunkerque, Fosse-sur-Mer et Pont-à-Mousson).

LEXIQUE

BF : Blast Furnace (haut fourneau)

BOF : Basic Oven Furnace
(convertisseur à oxygène)

DRI : Direct Reduction of Iron ore (ou Direct Reduced Iron)

EAF : Electric Arc Furnace

HBI : Hot Briquetted Iron

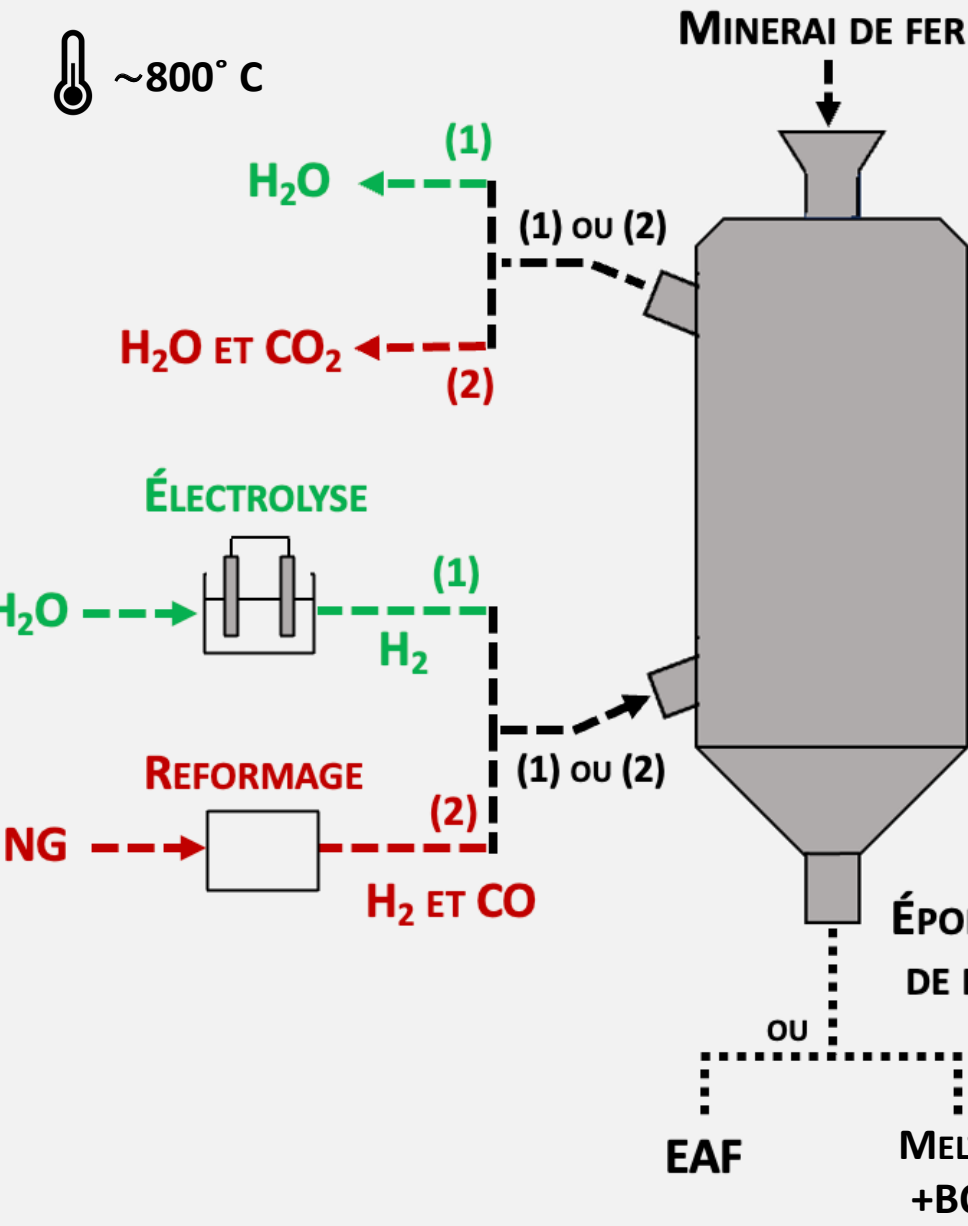
Sponge iron : Direct Reduced Iron
(éponge de fer ou fer pré-réduit)

NG : natural gas (CH₄)

MOE : Molten Oxide Electrolysis

DRI – DIRECT REDUCTION OF IRON ORE

La filière de réduction directe représente **7% de la production mondiale d'acier**. Dans ce procédé, le minerai de fer est réduit à l'état solide pour obtenir une éponge de fer. Une fois obtenue, elle peut être compactée sous forme de briquettes ce qui permet le transport sans risque de réoxydation.



Ce type de production fonctionne aujourd'hui essentiellement sur des procédés au **gaz naturel** (2). Le gaz réducteur composé de H₂ et de CO est généralement produit par reformage du CH₄ à l'extérieur du réacteur. Le NG-DRI émet **500-1000kgCO₂/t_{acier}**. L'utilisation de **100% d'H₂**, produit par électrolyse avec de l'électricité bas carbone (1), permet d'atteindre des émissions **inférieures à 50 kgCO₂/t_{acier}**. Les technologies actuelles de réacteur (MIDREX et Energiron) permettent ainsi d'envisager la transition vers une production d'acier décarboné.

INCONVÉNIENTS

- DRI-EAF : nécessite un minerai avec une teneur en fer >65% (3% des ressources). Solution : DRI-Melt+BOF.
- Problème d'approvisionnement en H₂ : le H₂-DRI nécessite 50-100 kgH₂/t_{acier} pour un coût actuel de 5-10€/kgH₂

HYBRIT



Luleå et Gällivare, Suède

Opérateurs : SSAB, LKAB, Vattenfall



Capacité : **1,2 Mt/an**



Technologie : **DRI+EAF**
Gaz réducteur : **100% H₂**



Projet pilote : **2021**
Échelle industrielle : **2025**

- Production d'hydrogène par électrolyse (énergie suédoise très peu carbonée) et stockage sur site (chambres souterraines).

- Résultats de l'usine pilote : production de la première plaque d'acier avec 100% d'hydrogène en août 2021. Émissions aussi basses que 42 kgCO₂/t_{acier}

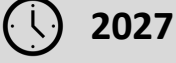
- Subventions reçues de l'UE. Contrats d'approvisionnement en acier bas carbone signés avec des groupes industriels (Volvo, Epiroc).

tkH2Steel

Duisburg, Allemagne par Thyssenkrupp



2,5 Mt/an



2027

Technologie : **DRI+Melt+BOF**

Gaz réducteur : **NG → 100% H₂** en 2029

- Objectif : remplacer les 4 BF du site de Duisburg, responsables de 2% des émissions allemandes.

- Subventions publiques : 2 milliards €

HBZX

Heibei, Chine par HBIS



0,6 Mt/an



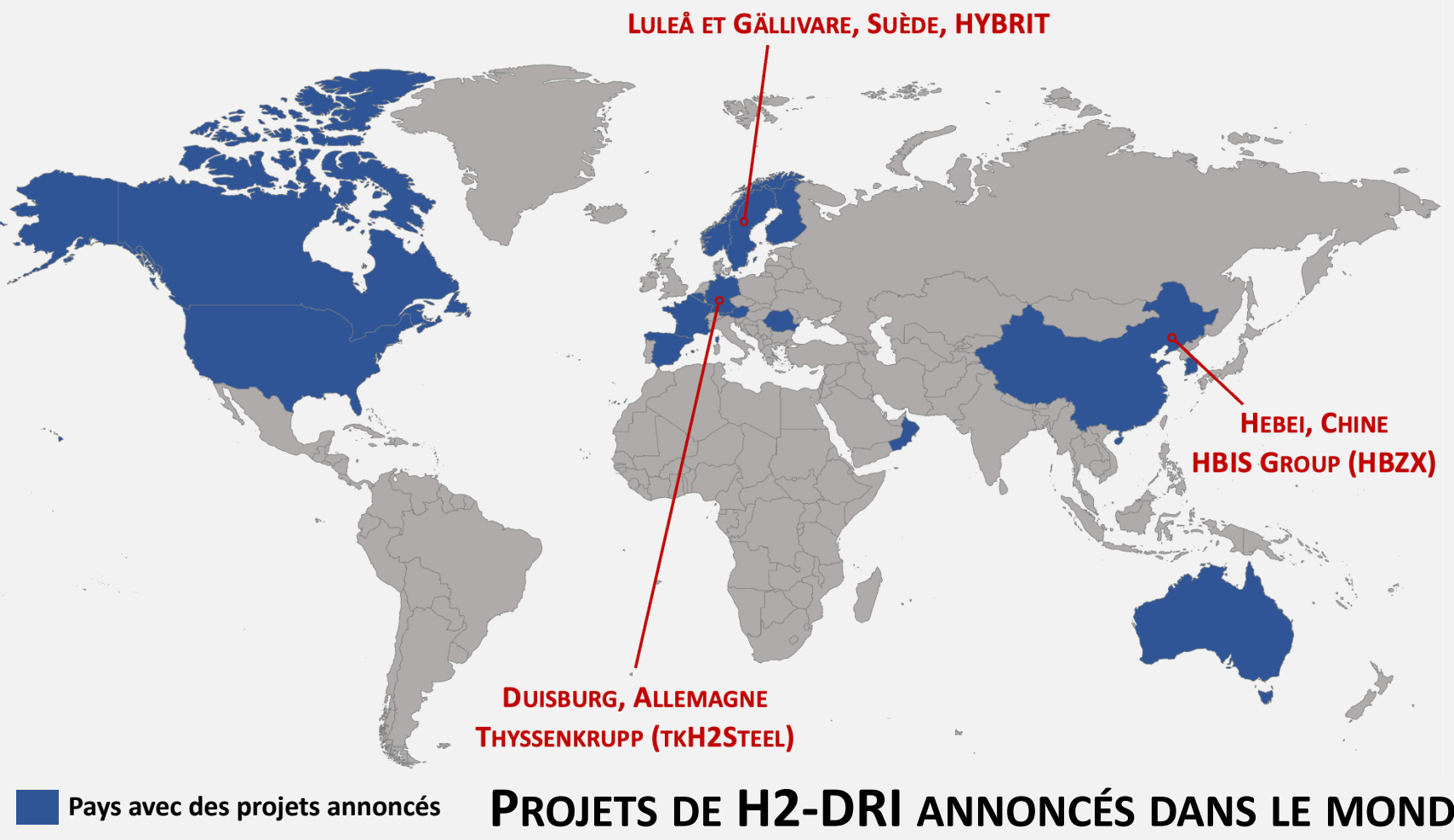
2023

Technologie : **DRI+EAF**

Gaz de cokerie (60% H₂, 25% CH₄, CO)

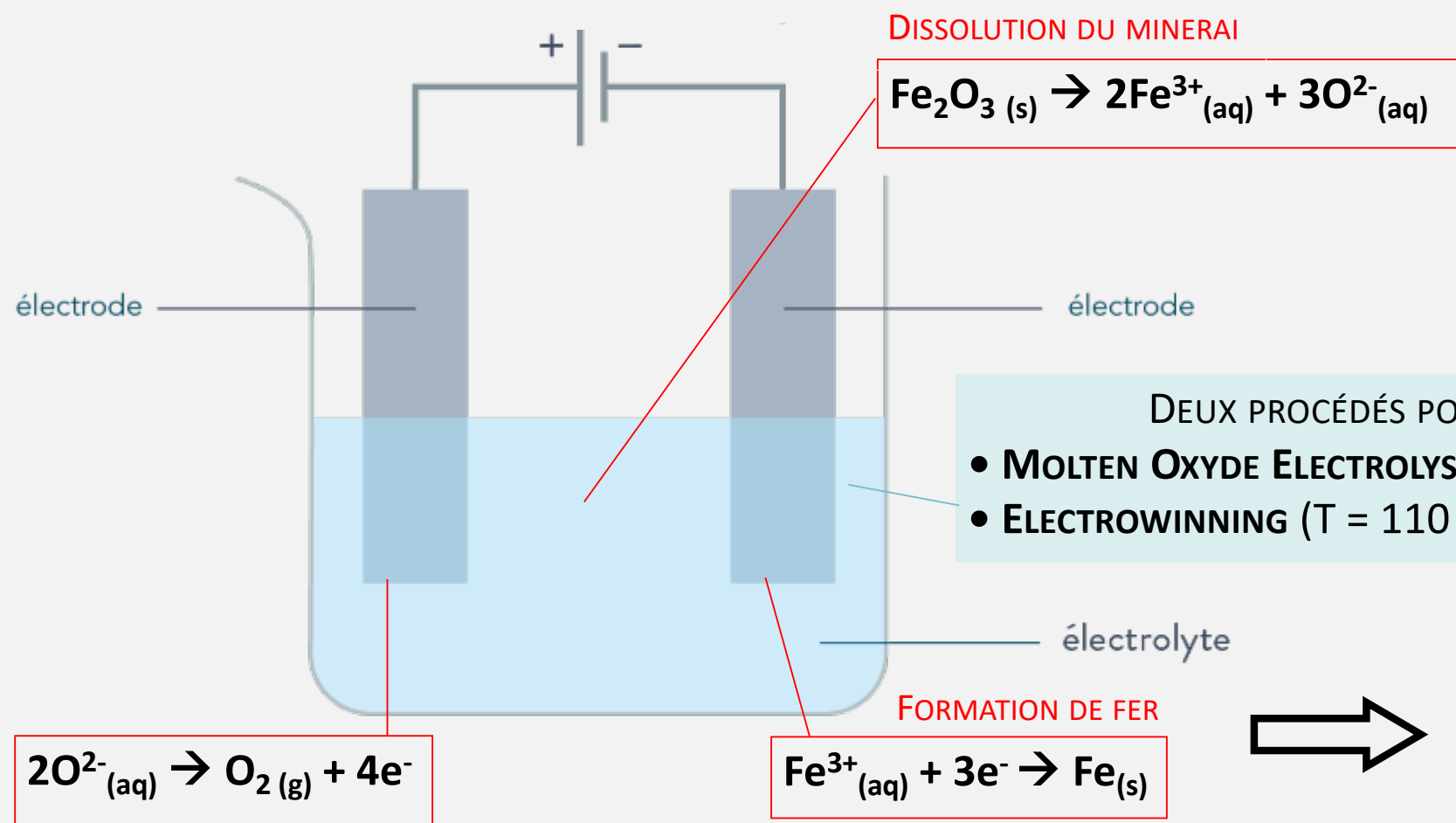
- Premier projet à l'échelle industrielle dans le monde à produire de l'acier avec plus de 60% de H₂.

- Émissions : 125-250 kgCO₂/t_{acier}



PROJETS DE H2-DRI ANNONCÉS DANS LE MONDE

ÉLECTROLYSE DU MINÉRAI DE FER



AVANTAGES

- Aucune émission directe de CO₂ : les émissions indirectes dépendent de l'origine de l'électricité utilisée
- Possibilité de valoriser l'O₂
- Efficacité énergétique : **10-15GJ/t_{acier}**

INCONVÉNIENTS

- CAPEX important et forte dépendance au prix de l'électricité
- Technologie non mature : incertitudes sur ses performances réelles
- Production d'électrode polluante

BOSTON METAL

Massachusetts, États-Unis

Société américaine fondée en 2023
Développe une **technologie d'électrolyse du fer par MOE**



2022 : 1^{er} test d'une cellule MOE de 25 kA aux États-Unis

2024 : ouverture d'une cellule MOE au Brésil pour recycler les déchets miniers brésiliens. Nommée parmi les 100 entreprises les plus influentes du monde selon The Time.

2026 : commercialiser la cellule MOE pour produire de l'acier vert.



Levée de fond de 370 000 000\$ en 2024

ACCOMPAGNEMENTS DE LA DÉCARBONATION

L'industrie de l'acier est difficile à décarboner en raison de besoins d'investissement importants, de nouvelles technologies incertaines et d'un environnement très concurrentiel. Néanmoins, plusieurs outils sont mis en œuvre pour y contribuer :

STRATÉGIES BAS CARBONE

- Objectifs de l'IEA pour le Net Zero en 2050
- Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) en France : diminuer de 81% les émissions du secteur de l'industrie en 2050 par rapport à 2015. Dans ce cadre, l'ADEME a construit des Plans de Transition Sectoriel (PTS) pour indiquer aux acteurs et aux pouvoirs publics des orientations à suivre afin de respecter leurs objectifs.

MÉCANISME D'AJUSTEMENT CARBONE AUX FRONTIÈRES

- EU CBAM : impose un prix carbone sur certains produits importés de pays avec peu de normes environnementales. L'objectif est de maintenir une concurrence équitable tout en incitant des pays à adopter des politiques climatiques.

TAXE CARBONE

- EU-ETS system : fixe un plafond d'émissions de CO₂ pour une industrie

CERTIFICATIONS

- IEA : propose une certification d'acier Near-Zero (50-400 kgCO₂/t_{acier} selon la proportion de ferraille utilisée)
- ResponsibleSteel Certification, Xcarb

DEMANDE

- En octobre 2023, BNEF avait recensé 73 accords d'approvisionnement d'acier décarboné. Forte demande, notamment du secteur de l'automobile (HYBRIT, Stegra).

SUBVENTIONS

- H2-DRI : nombreux projets européens subventionnés (HYBRIT, tkH2Steel, mais aussi les projets d'ArcelorMittal, Stegra et Salzgitter), surtout pour l'approvisionnement en hydrogène bas carbone.

RÉALISME D'UN SCÉNARIO DE DÉCARBONATION

SCÉNARIO NET ZERO (IEA)



Réduire de **95%** les émissions d'ici 2050

DÉVELOPPEMENT H2-DRI

- Incertitudes vis-à-vis de la disponibilité de minerai à forte teneur en fer (seulement 3% de l'approvisionnement est utilisable)
- Incertitudes sur le H₂ (approvisionnement et stockage) : électricité bas carbone indisponible, coût du H₂ trop élevé pour être viable (actuellement 300-500€/t_{acier} pour l'achat d'hydrogène, sachant que l'acier se vend ~500€/t)
- ArcelorMittal a mis en pause tous ses projets en Europe : trop d'incertitude sur le marché de l'acier (forte compétitivité, marché de l'automobile et de la construction au ralentit en Europe, etc.). En Allemagne, Thyssenkrupp a annoncé supprimer 40% de ses effectifs d'ici 2030.

AUTRES DÉFIS

- Disparités régionales dans les engagements climatiques
- Investissements de plusieurs trillions nécessaires

