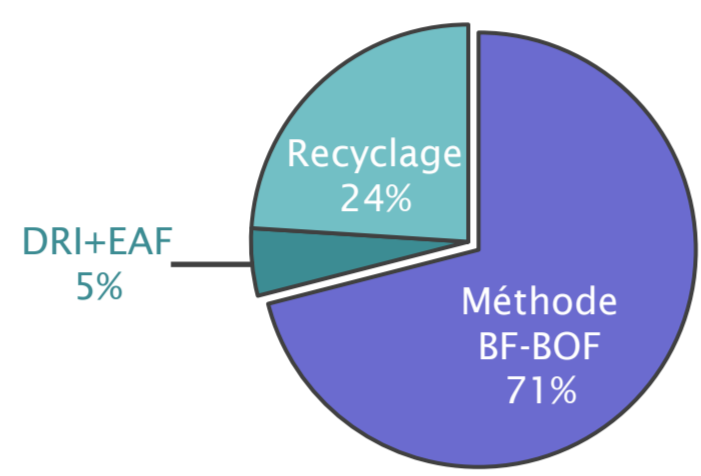


## État de l'art : production actuelle d'acier et enjeux liés

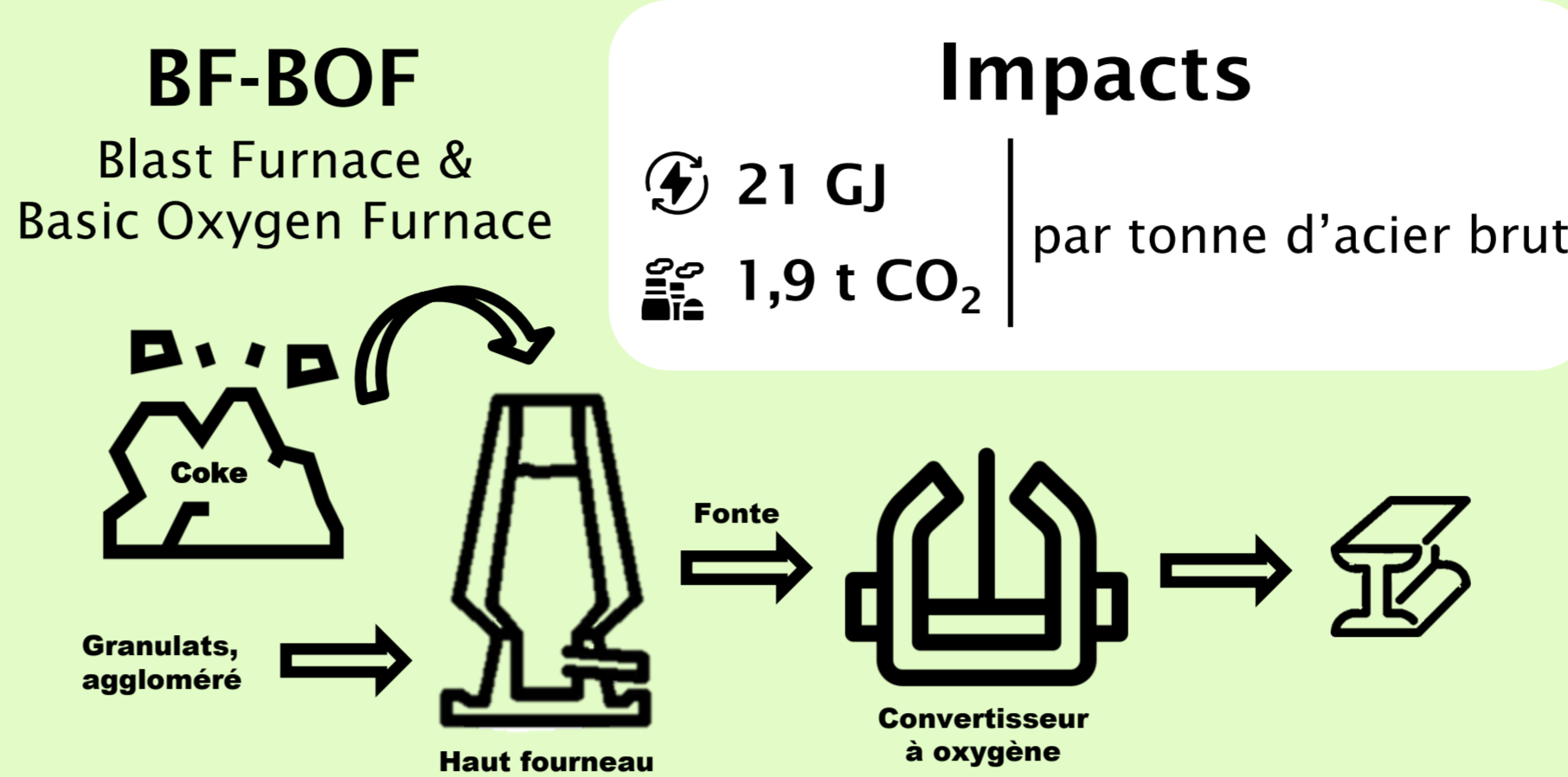
Le secteur de l'acier s'est très largement développé dès la fin du XIXème siècle et continue de croître aujourd'hui : la production mondiale de fer et d'acier a **triplé entre 2000 et 2018**. En effet, l'acier est utilisé dans de nombreux domaines tels que la construction, l'armée ou encore l'industrie (automobile, ferroviaire...). Avec ses 29 milliards d'euros de valeur ajoutée et ses 330 000 emplois directs, le secteur est devenu stratégique en Europe. Néanmoins, les moyens de productions actuels de l'acier émettent majoritairement beaucoup de gaz à effet de serre (GES). Cette étude s'attache alors à comparer deux procédés permettant de décarboner le secteur de l'acier : le *Direct Reduced Iron (DRI)* et l'*Electrowinning*.

**Secteur de l'acier**

- 6% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>
- 29 milliards d'euros de valeur ajoutée en Europe
- 330 000 emplois directs en Europe



Part des différents procédés dans la production mondiale



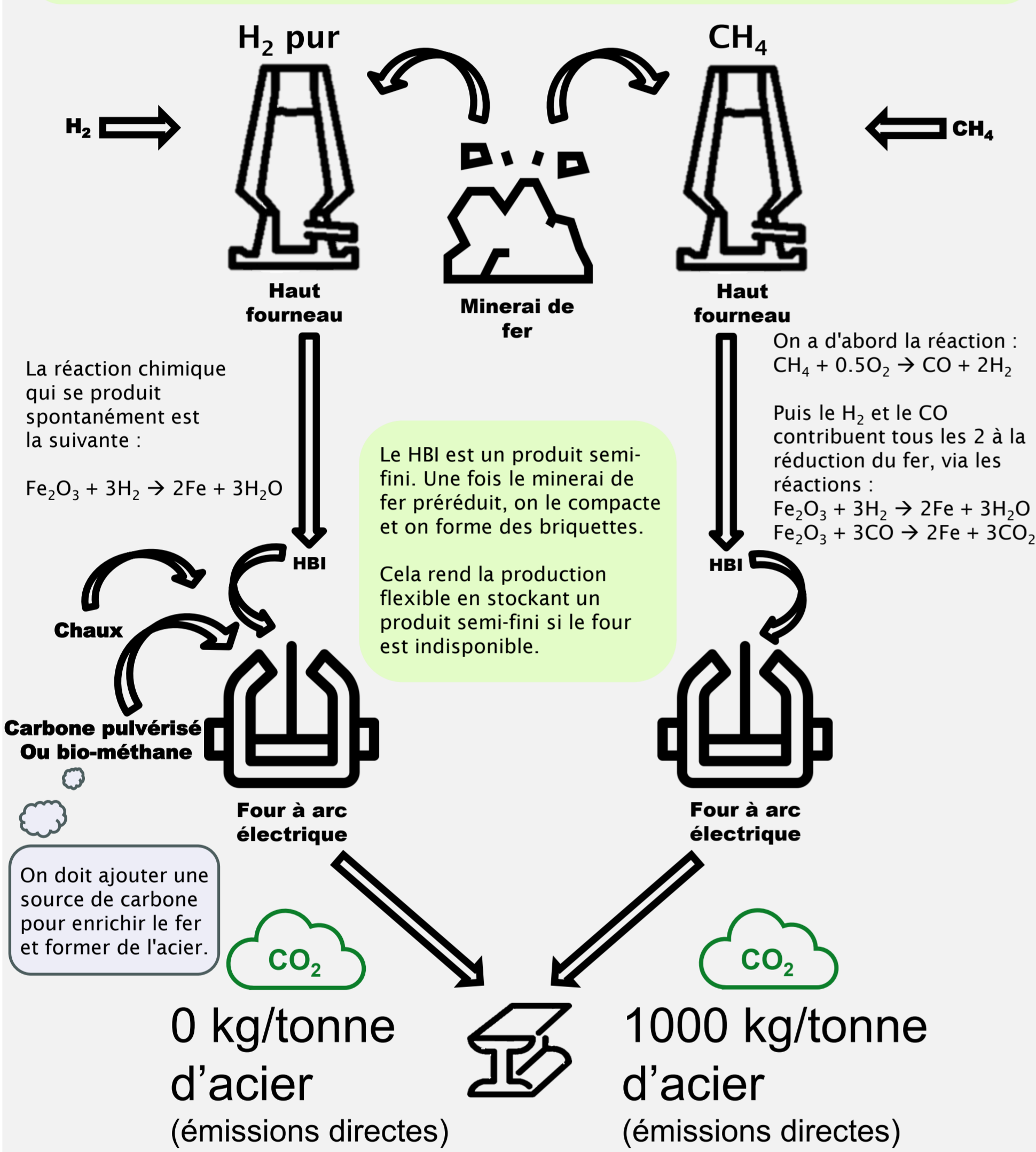
Dans un premier temps, on introduit du minerai de fer ainsi que du coke dans un haut-fourneau (BF). À haute température, le coke se transforme en oxyde de carbone (CO), un gaz qui va le réduire en fer en retirant l'oxygène du minerai. On obtient alors du fer chaud en fusion (la fonte) contenant du carbone (environ 4%). La fonte est ensuite introduite dans un convertisseur à oxygène (BOF) qui permet, grâce à l'injection d'oxygène, de brûler les impuretés et de diminuer la proportion de carbone à 1% : on obtient de l'acier.

## Lexique des abréviations

- BF : Blast Furnace = haut-fourneau
- BOF : Basic Oxygen Furnace = convertisseur à oxygène
- DRI : Direct Iron Reduction = réduction directe du fer
- EAF : Electric Arc Furnace = four à arc électrique
- EWIN : Electrowinning
- HBI : Hot Briquetted Iron = DRI qui a été compacté à haute température (plus de 650°C)
- MOE : Molten Oxide Electrolysis = électrolyse des oxydes fondus

## DRI Haute température

Le DRI (Direct Iron Reduction), ou minerai de fer pré-réduit est un demi-produit sidérurgique. On peut l'obtenir en utilisant uniquement du H<sub>2</sub> pour la réduction ou en incluant du CH<sub>4</sub>.



- ✓ Processus flexible en demande d'électricité grâce au stockage de l'hydrogène et du fer briqueté à chaud
- × Nécessité de produire l'hydrogène sur site en l'absence de réseau commun
- × Forte dépendance des émissions indirectes en fonction de la provenance de l'électricité

## Électrolyse du minerai de fer

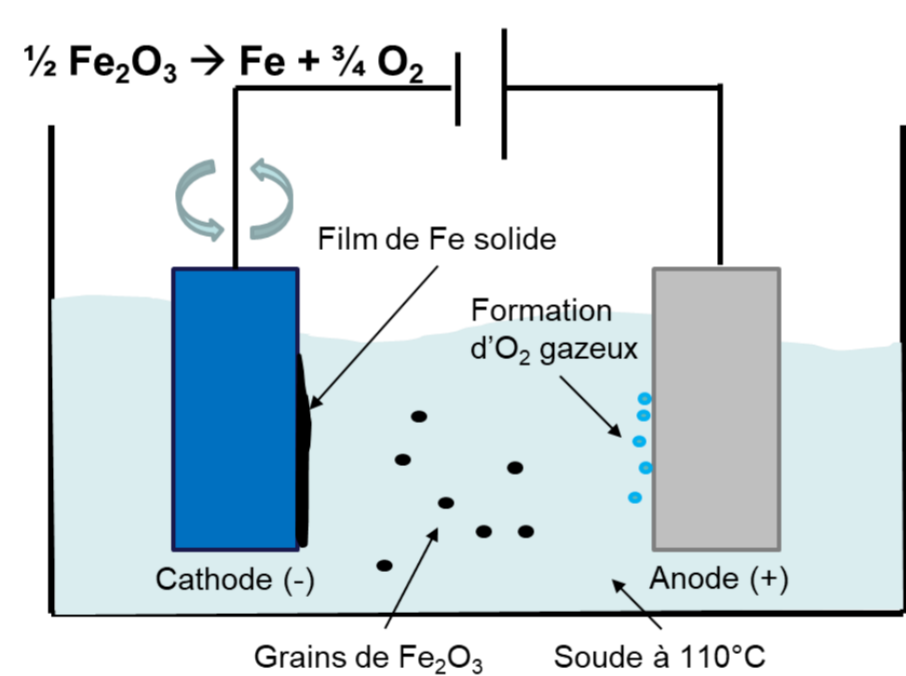
2 méthodes : Electrowinning et MOE

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique.

**BUT :**  
extraire le fer pur du minerai de fer

### Electrowinning

Electrowinning : électro-obtention ou extraction par voie électrolytique



- ✓ Technique + avancée que MOE
- ✓ Demande en électricité assez flexible : gestion des appels de puissance au réseau + simple

0 kg/tonne d'acier (émissions directes)

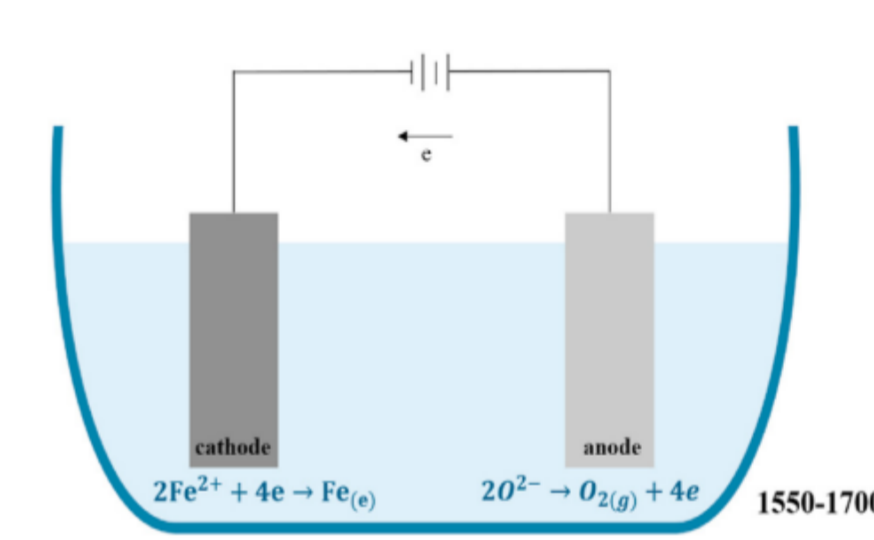
- × Le fer est obtenu à l'état solide : il faut le fondre pour le travailler
- ✓ Produit secondaire : O<sub>2</sub>, qui peut être valorisé
- ✓ Modularité des infrastructures

### PRINCIPE

1. Le minerai de fer est dissous dans une solution (= électrolyte). On envoie un courant électrique entre une **anode** qui reçoit les ions O<sup>2-</sup>, et la **cathode** qui reçoit les ions Fe<sup>2+</sup> où ils sont réduits (i.e. gagnent des électrons).
2. Obtention de fer pur sur la cathode.
3. Transformation du fer en acier grâce à un EAF.

### MOE

MOE : Molten Oxide Electrolysis, ou Électrolyse des oxydes fondus (Stade de développement moins avancé que l'Electrowinning)



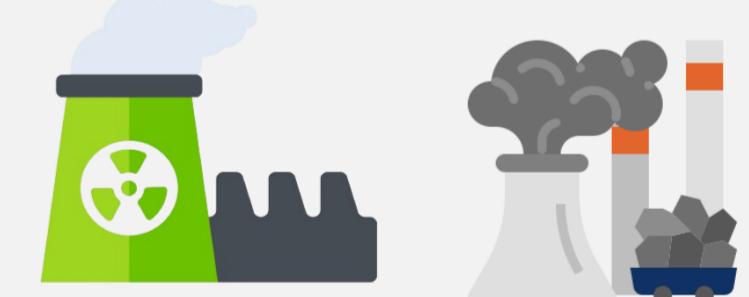
- ✓ Fer obtenu à l'état liquide, ce qui facilite les traitements ultérieurs et économise de l'énergie

- × Difficulté pour trouver des matériaux pour anode/cathode qui supportent les conditions de réaction sans se détériorer
- × Appel continu de puissance

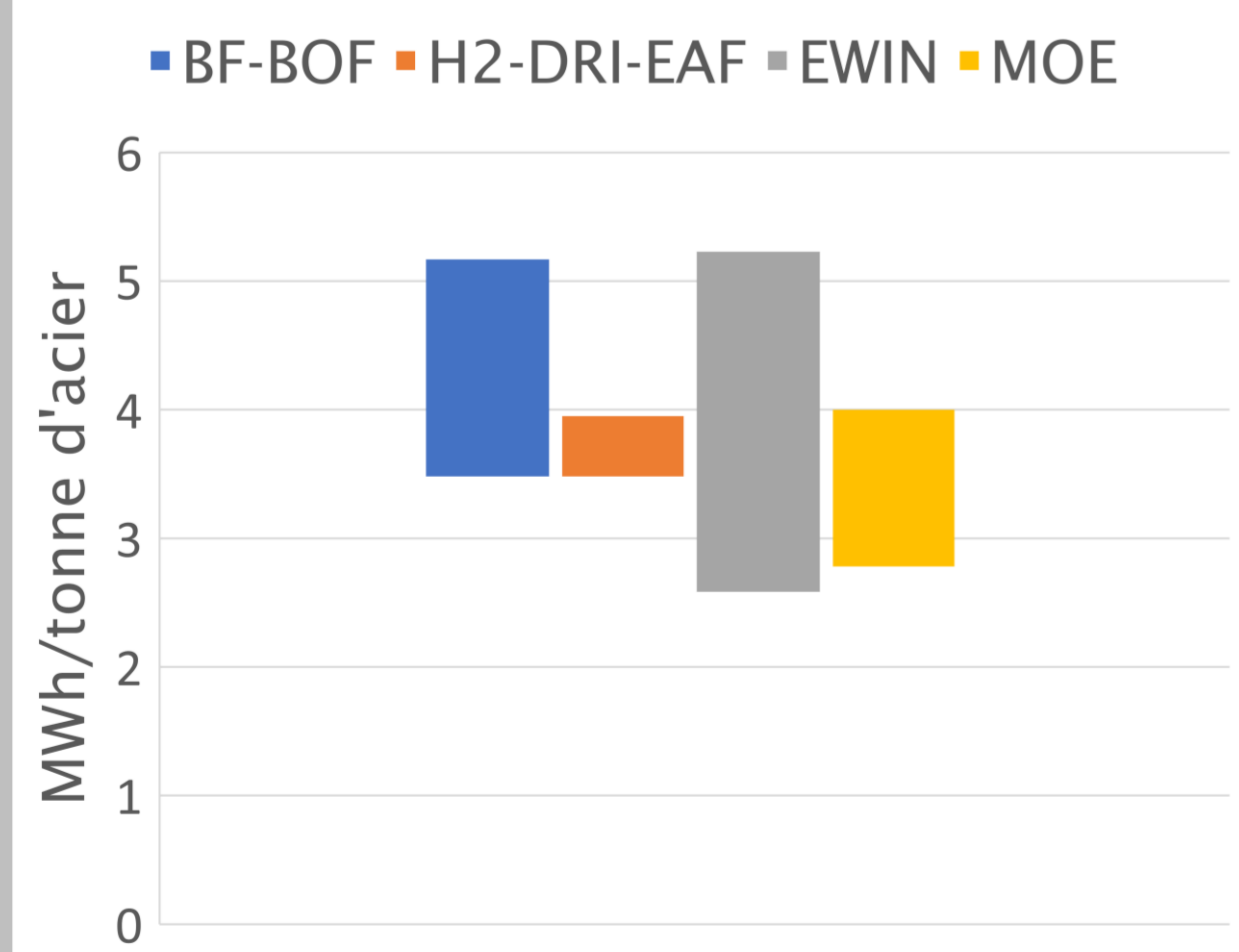
**Électrolyte :** solvant composé de deux oxydes à 1600°C, soit au-dessus du point de fusion du fer (1538 °C).  
**Anode :** matériel inerte vis-à-vis du solvant d'oxydes → difficile à trouver.  
**Cathode :** bac où se dépose du fer liquide.

0 kg/tonne d'acier (émissions directes)

- × Nécessité de nouvelles infrastructures → pas avant 2050
- × Forte dépendance des émissions indirectes en fonction de la provenance de l'électricité

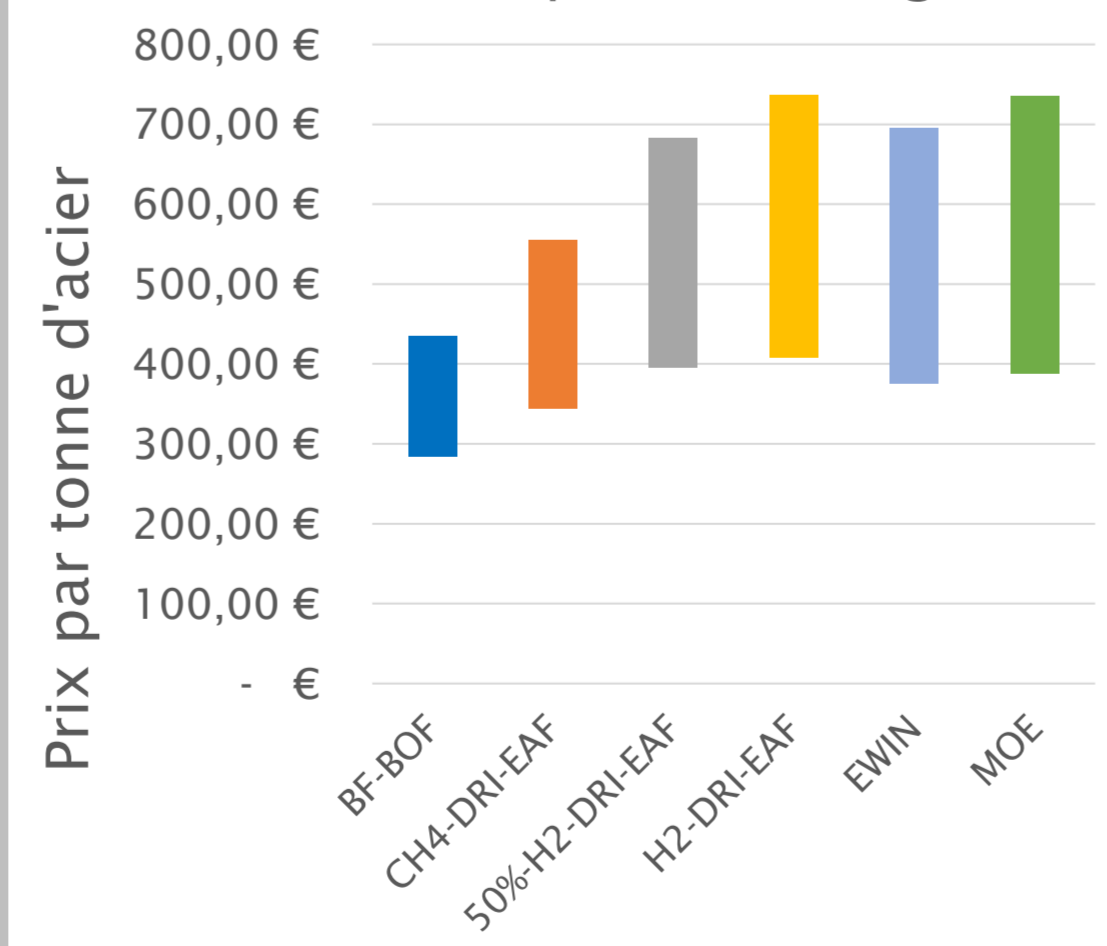


Besoins en énergie par tonne d'acier pour différentes méthodes



Nous compilons ici différentes données de la littérature sur la consommation en énergie des différentes méthodes. On réalise ainsi une **étude de sensibilité** en représentant les valeurs min/max.

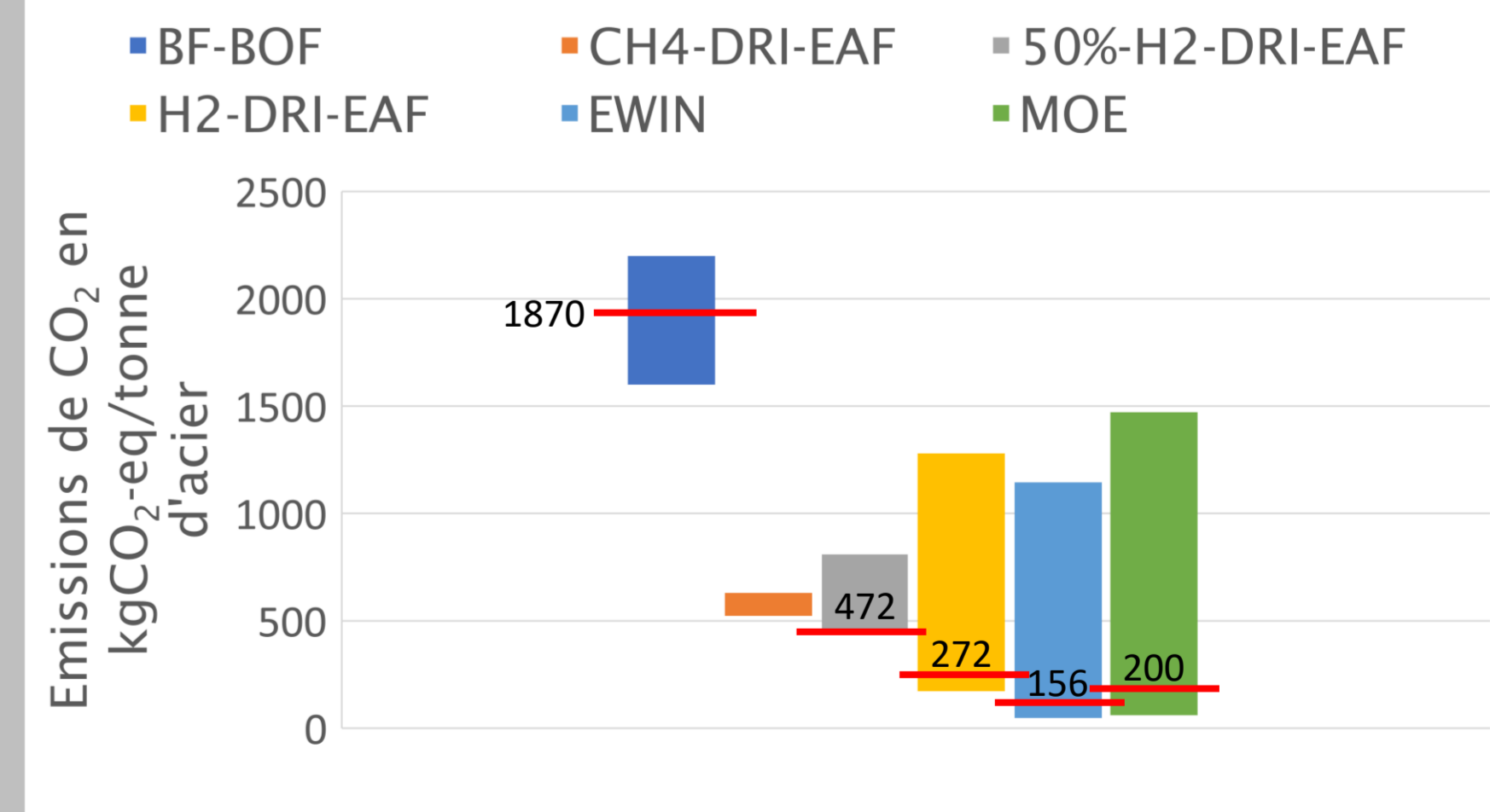
Prix de l'acier par technologie



À CAPEX et OPEX constants pour chaque méthode, on fait varier les prix de l'énergie et des matières premières pour en déduire des valeurs min/max sur les coûts de production.

Nous compilons ici différentes données sur les émissions totales des différentes méthodes, en faisant varier le facteur d'émission du mix électrique. Ainsi, pour DRI, EWIN et MOE, on fait varier ce facteur de 15 gCO<sub>2</sub>-eq/kWh (mix 100% éolienne) à 368 gCO<sub>2</sub>-eq/kWh (mix de l'UE en 2023). On réalise ainsi une étude de sensibilité en représentant les valeurs min/max. Le mix électrique influe fortement sur les émissions de GES pour les méthodes nécessitant beaucoup d'électricité (H<sub>2</sub>-DRI-EAF, EWIN, MOE).

Emissions CO<sub>2</sub> totales pour différentes méthodes



Barre rouge : valeur typique pertinente pour la France en 2023 (électricité à 50 gCO<sub>2</sub>eq/kWh)

### Nouvelles approches : augmenter l'utilisation de H<sub>2</sub>

- L'utilisation d'hydrogène en tant que gaz auxiliaire de réduction pourrait réduire les émissions d'un BF-BOF de 21,4%.
- Le Green-H<sub>2</sub> (resp. Blue-H<sub>2</sub>) est compétitif à partir d'un prix du carbone de 300\$ (resp. 120\$) par tonne de CO<sub>2</sub> pour un BF.
- Augmenter la proportion de H<sub>2</sub> dans le gaz réducteur du DRI est plus simple que dans un BF : cette proportion peut monter jusqu'à 30% sans changer le processus.

