

Decarbonizing the steel industry : techno-economic assesement and modeling of electric arc furnace (en ce compris une introduction à la méthodologie de la recherche

Auteur : Massau, Lisa

Promoteur(s) : Léonard, Grégoire

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil en chimie et science des matériaux, à finalité spécialisée en Chemical Engineering

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26138>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Decarbonizing the steel industry : techno-economic assesement and modeling of electric arc furnace

By MASSAU Lisa

Supervisor: Grégoire LÉONARD

Thesis presented to obtain the degree of
Master of Science in Energy Engineering

Academic year: 2025–2026

Abstract

The steel industry is responsible for approximately 7% of global CO₂ emissions, making its decarbonization a critical challenge in the pursuit of carbon neutrality by 2050. Among the available steelmaking routes, the electric arc furnace (EAF) represents one of the least carbon-intensive technologies, relying primarily on recycled scrap as raw material. This thesis presents a techno-economic assessment of stainless steel production via EAF, with a focus on modelling alternative pathways to further reduce its environmental impact.

The production process considered consists of three main steps: the electric arc furnace, the argon oxygen decarbonizer (AOD), and continuous casting followed by hot rolling. Each step was modelled using a black-box approach, with mass and energy balances derived from literature. The modelling framework used is OSMOSE, a Lua-based multi-objective optimization tool developed by the IPESE group at EPFL. Five configurations were investigated and compared: the conventional natural gas-based process (NG), natural gas with carbon capture (NG+CC), biomethane substitution (BIOCH₄), biomethane with carbon capture (BIOCH₄+CC), and hydrogen substitution (H₂). Three energy price scenarios were considered: a current 2026 scenario, an optimistic ideal scenario, and a competitive scenario as well as two emission factor contexts reflecting current and projected 2050 electricity mixes.

Results show that fuel switching to biomethane reduces scope 1 emissions by 37% compared to the base case, while the addition of carbon capture using monoethanolamine (MEA) absorption achieves reductions of up to 93% when combined with biomethane. From an economic standpoint, the natural gas configuration remains the cheapest in most scenarios, as raw material costs dominate the total cost structure. Biomethane emerges as the most promising near-term alternative, offering a favourable balance between emission reductions and cost, particularly under the ideal pricing scenario. Hydrogen shows potential in future scenarios where its production cost decreases significantly, but remains limited today by both cost and availability constraints. Carbon capture technologies, while highly effective in reducing direct emissions, are penalized by their high energy consumption and associated fuel costs, rendering them economically unattractive under current and near-future conditions.

This study provides a decision-support framework for the EAF stainless steel industry and highlights that the economic viability of decarbonization pathways is highly sensitive to future energy price evolution and the availability of renewable fuels.

Resumé

L'industrie sidérurgique est responsable d'environ 7% des émissions mondiales de CO₂, faisant de sa décarbonation un défi majeur dans la poursuite de la neutralité carbone d'ici 2050. Parmi les différentes voies de production d'acier existantes, le four à arc électrique (EAF) représente l'une des technologies les moins émettrices en carbone, reposant principalement sur de la ferraille recyclée comme matière première. Ce travail de fin d'études présente une évaluation technico-économique de la production d'acier inoxydable par EAF, en s'intéressant à la modélisation de voies alternatives permettant de réduire davantage son impact environnemental.

Le procédé de production étudié comprend trois étapes principales : le four à arc électrique, le convertisseur argon-oxygène (AOD) et la coulée continue suivie du laminage à chaud. Chaque étape a été modélisée à l'aide d'une approche boîte noire, avec des bilans de masse et d'énergie issus de la littérature. L'outil de modélisation utilisé est OSMOSE, un logiciel d'optimisation multi-objectifs développé par le groupe IPESE de l'EPFL. Cinq configurations ont été étudiées et comparées : le procédé conventionnel au gaz naturel (NG), le gaz naturel avec capture de carbone (NG+CC), la substitution par du biométhane (BIOCH₄), le biométhane avec capture de carbone (BIOCH₄+CC), et la substitution par de l'hydrogène (H₂). Trois scénarios de prix de l'énergie ont été considérés : un scénario actuel 2026, un scénario idéal optimiste et un scénario compétitif ainsi que deux contextes de facteurs d'émission reflétant respectivement les mix électriques actuels et projetés à l'horizon 2050.

Les résultats montrent que la substitution du gaz naturel par du biométhane permet de réduire les émissions de scope 1 de 37% par rapport au cas de référence, tandis que l'ajout d'une unité de capture du carbone par absorption à la monoéthanolamine (MEA) permet d'atteindre des réductions allant jusqu'à 93% en combinaison avec le biométhane. D'un point de vue économique, la configuration au gaz naturel reste la moins coûteuse dans la plupart des scénarios, les coûts des matières premières dominant la structure de coût totale. Le biométhane apparaît comme l'alternative la plus prometteuse à court terme, offrant un équilibre favorable entre réduction des émissions et coût de production, en particulier dans le scénario de prix idéal. L'hydrogène présente un potentiel intéressant dans les scénarios futurs où son coût de production diminue significativement, mais reste aujourd'hui limité par des contraintes à la fois économiques et de disponibilité. Les technologies de capture du carbone, bien qu'efficaces pour réduire les émissions directes, sont pénalisées par leur forte consommation énergétique et les coûts en combustible associés, les rendant peu attractives économiquement dans les conditions actuelles et à court terme. Cette étude fournit un outil d'aide à la décision pour l'industrie sidérurgique utilisant le four à arc électrique et souligne que la viabilité économique des voies de décarbonation est fortement sensible à l'évolution future des prix de l'énergie et à la disponibilité des combustibles renouvelables.

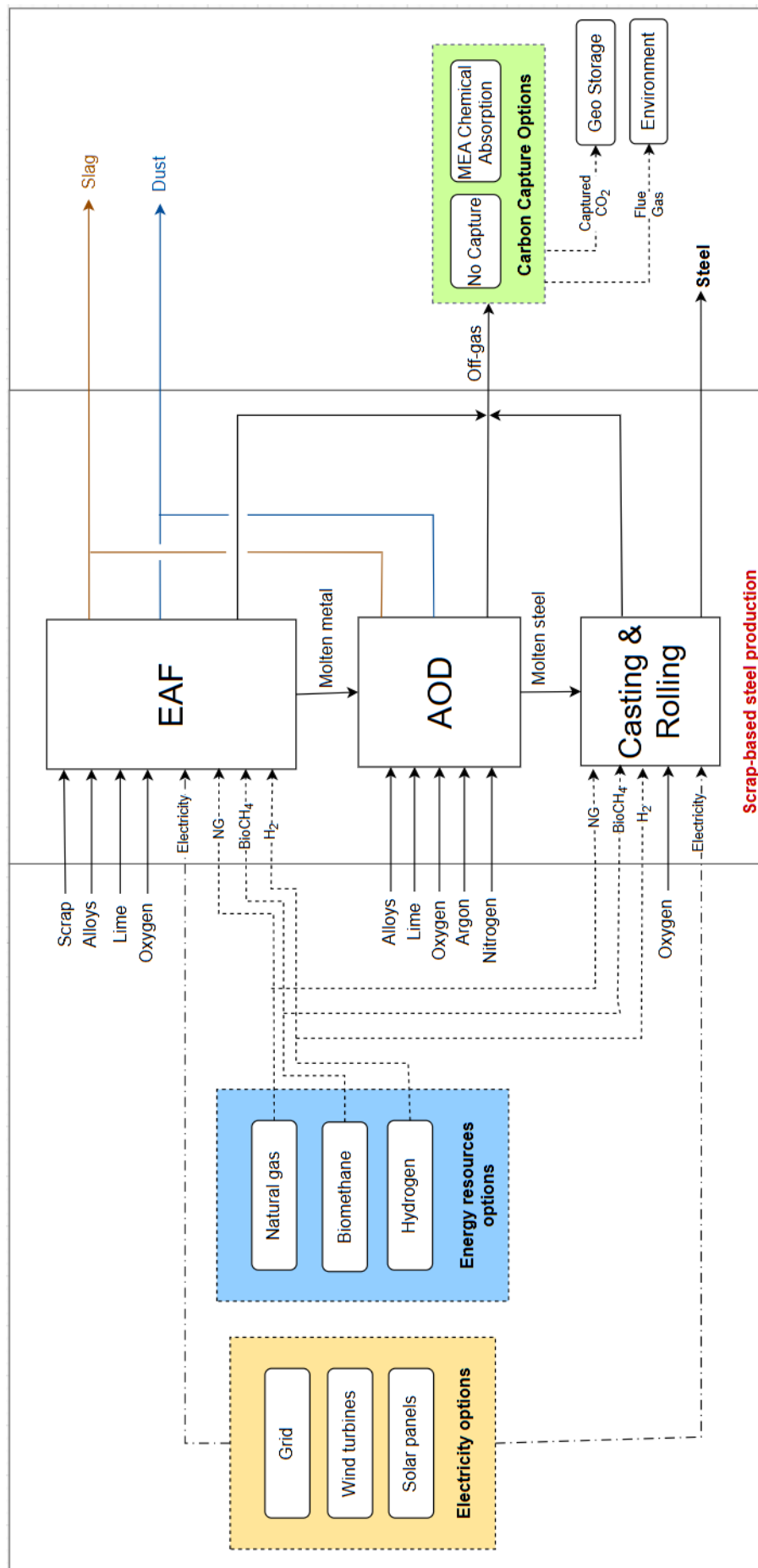


Figure 1: Superstructure of the stainless steel production

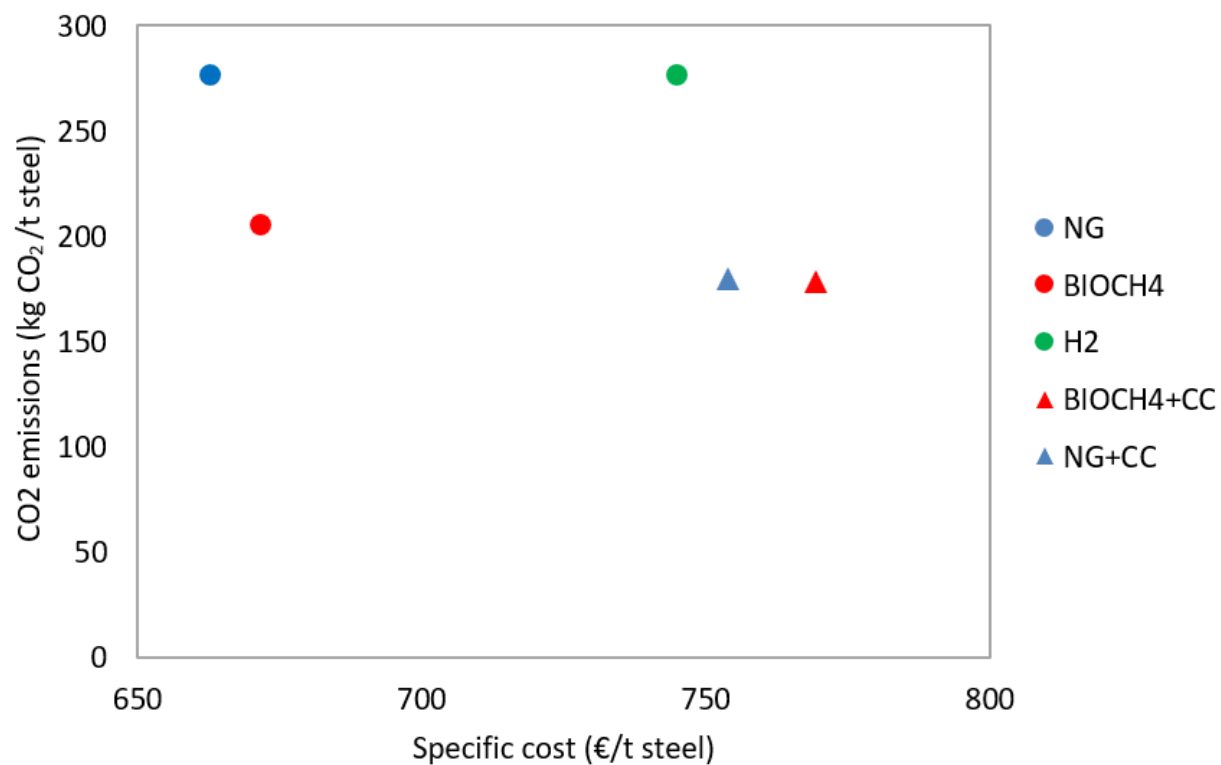


Figure 2: Specific total CO₂ emissions and specific cost for all cases in the 2026 pricing scenario

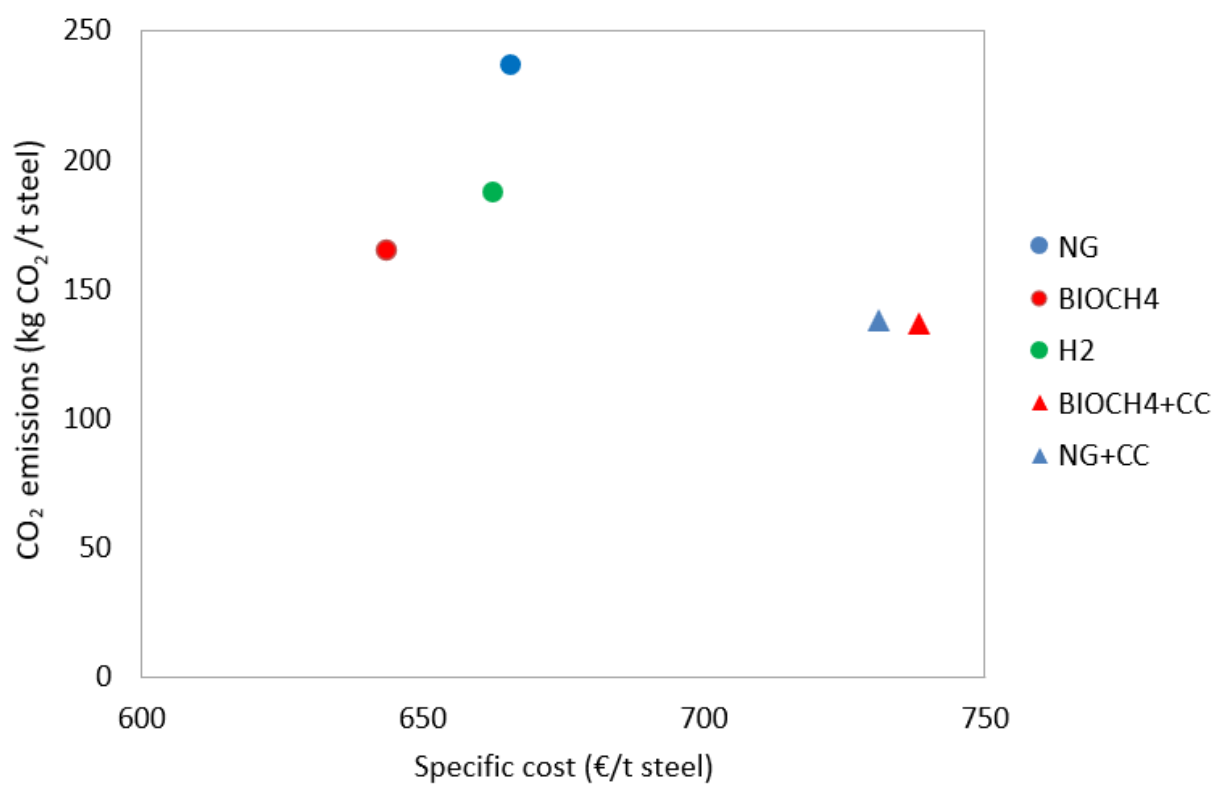


Figure 3: Specific total CO₂ emissions and specific cost for all cases in the ideal pricing scenario

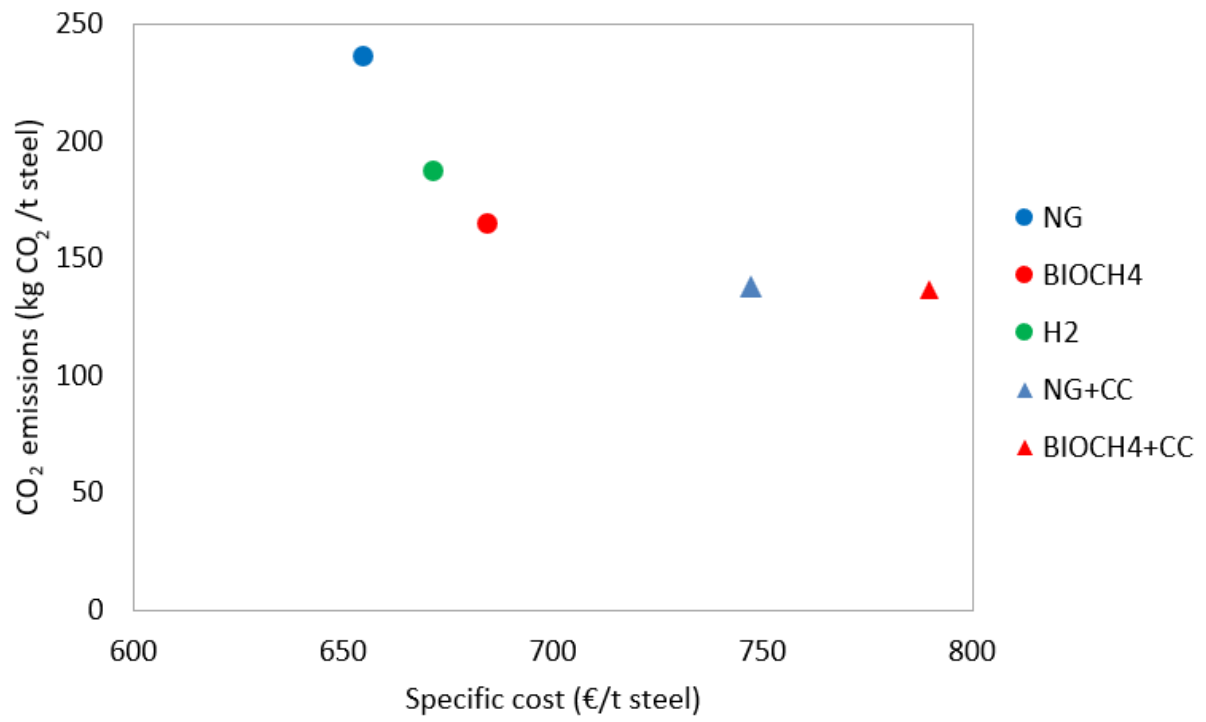


Figure 4: Specific total CO₂ emissions and specific cost for all cases in the competition pricing scenario