Tenerrdis

PRHyUS – Sites Visits

07/10/2026



Valentin Maillot
07/10/2026

Table des matières

Visite du centre de R&D d'Inocel 3
1. Introduction et historique de l'entreprise Inocel 3
2. Évolution stratégique : de l'e-mobilité aux groupes électrogènes stationnaires 3
3. Architecture technique et spécifications des générateurs à hydrogène (GEN-Z 300 et GEN-Z 600) 3
4. Comparaison technico-économique : Groupes électrogènes à hydrogène face aux groupes diesel 4
5. Infrastructures industrielles, gigafactory de Belfort et écosystème R&D 5
6. Analyse des marchés cibles et contexte réglementaire : Le cas critique des Pays-Bas 5
7. Logistique d'approvisionnement en hydrogène et partenariats stratégiques (CELYHANS / Equans) 6
8. Retours d'expérience sur le terrain, cas d'usage et robustesse environnementale 6
9. Modèles économiques, commercialisation (CAPEX/OPEX) et services associés 7
10. Recommandations stratégiques et institutionnelles pour l'échelle européenne 7
Visite du site de production d'hydrogène vert Lhyfe en Grésivaudan 8
1. Introduction et contexte stratégique 8
1.1 Présentation de l'intervenant et du site 8
1.2 Implantation géographique et écosystème territorial 8
2. Analyse de la chaîne de procédé d'électrolyse et sous-systèmes auxiliaires 8
2.1 Description du procédé 8
2.2 Chaîne de transformation énergétique et d'électrolyse 9
2.3 Traitement des gaz, compression et stockage de transition 9
3. Sécurité, cadre réglementaire et réhabilitation du site 10
3.1 Gestion des risques industriels et consignes de sécurité 10
3.2 Génie civil et dépollution d'un site dégradé 10
4. Modèle économique, sourcing énergétique et certification 10
4.1 Approvisionnement électrique et certification RFNBO 10
4.2 Facteur de charge et services au réseau (*Grid Services*) 11
5. Synthèse comparative du parc de production Lhyfe 11
6. Conclusion et perspectives industrielles 12
Visite de l'aciérie d'Ugitech 12
1. Contexte et présentation générale du groupe Swiss Steel et d'Ugitech 12
1.1. Organisation & Chiffres clés du groupe 12
1.2. Filiales principales du groupe 13
1.3. Positionnement commercial & Gamme de produits 13

1.4. Ugitech en chiffres 13
1.5. Engagements RSE et Certifications 14
2. Aperçu technique du procédé de fabrication d'acier inoxydable 14
2.1. Voie Électrique vs Voie Primaire 14
2.2. Description détaillée du flux de production à l'Aciérie 14
2.3. Laminoir à chaud et Transformations à froid 15
3. Feuille de route de décarbonation et stratégie multi-leviers 16
3.1. Empreinte Carbone et Poids du Scope 3 16
3.2. Les 6 Piliers de la Stratégie Ugitech 16
3.3. Trajectoires SBTi (Near-Term 2030 et Net-Zero) 16
4. Projet d'électrification et hybridation du four de réchauffage (four K10) 17
4.1. Architecture du Four K10 (54m) 17
4.2. Concept d'Électrification des Zones 1 et 2 17
4.3. Défis Techniques & Maintenance 18
5. Projet hydrogène européen "HYDREAMS" et démonstrateurs industriels 18
5.1. Présentation du Projet HYDREAMS 18
5.2. Essais en Laboratoire (Université de Graz - Work Package 2) 19
5.3. Projet d'Oxycombustion / Enrichissement en O2 (Démonstrateur 2 - Four K10) 19
5.4. Démonstrateur 1 - Four de Recuit Fil Machine (Ugine) 20
6. Analyse économique, compétitivité et enjeux énergétiques en europe 20
6.1. Défis OPEX vs CAPEX 20
6.2. Volatilité des Marchés Électriques 21
6.3. Concurrence Internationale & Mécanisme CBAM 21
6.4. Structure des Coûts de Production 21
7. Conclusion et recommandations stratégiques 22
7.1. Synthèse des avancées technologiques 22
7.2. Recommandations pour les décideurs publics et industriels 22

Visite du centre de R&D d'Inocel

1. Introduction et historique de l'entreprise Inocel

La société Inocel a été fondée il y a quatre ans, avec pour origine la genèse du projet GEN Z initiée en étroite collaboration avec le CEA. L'entreprise a bénéficié de la valorisation de technologies de pointe issues directement des centres de recherche, en s'appuyant sur plus de 25 ans d'expertise du CEA dans le domaine des piles à combustible. Dès sa création, Inocel a structuré sa gouvernance et levé un capital initial de 16 millions d'euros pour accélérer son passage de la recherche au développement industriel.

L'entreprise s'est rapidement développée, portant ses effectifs de 30 collaborateurs à l'époque de l'arrivée de Nadine Aubinais à environ 75 à 80 experts spécialisés en ingénierie, industrialisation et systèmes énergétiques répartis entre son siège social et centre de R&D à Grenoble, son antenne d'avancée systèmes pour la marine et la mobilité à Cannes, et sa gigafactory de Belfort. La dynamique financière d'Inocel s'est consolidée en 2024 avec une levée de fonds majeure de 64 millions d'euros, portant le total des investissements sécurisés à 81 millions d'euros.

2. Évolution stratégique : de l'e-mobilité aux groupes électrogènes stationnaires

À ses débuts, la stratégie d'Inocel ciblait en premier lieu le marché de la mobilité électrique, en développant des chaînes de traction et des piles à combustible de forte puissance destinées aux camions et aux trains. Cependant, l'évolution du marché de l'hydrogène et les réalités économiques ont conduit l'entreprise à réorienter partiellement sa stratégie.

De nombreux constructeurs de premier rang sur le marché de la mobilité ont en effet repoussé leurs feuilles de route, annulé des projets ou cessé leurs activités. Face à cette situation, Inocel a identifié une opportunité majeure sur le marché de la production d'énergie stationnaire et temporaire, en concevant des générateurs d'hydrogène conteneurisés. Ce positionnement répond à des besoins urgents sur les sites industriels et les chantiers de construction, en particulier dans les pays européens soumis à des réglementations strictes interdisant les émissions de carbone et d'oxydes d'azote.

3. Architecture technique et spécifications des générateurs à hydrogène (GEN-Z 300 et GEN-Z 600)

Le cœur technologique d'Inocel repose sur une pile à combustible à membrane échangeuse de protons à haute puissance, structurée autour d'un stack de 300 kW. Cette pile se distingue par une réactivité exceptionnelle, lui permettant de passer de la puissance de repos à la puissance de crête en moins de deux secondes, une performance unique sur le marché obtenue grâce à des technologies brevetées.

La gamme de générateurs se décline en plusieurs versions conteneurisées selon la norme ISO :

- **GEN-Z 300 (Version initiale en conteneur de 20 pieds) :** Développe une puissance nominale de 300 kW (300 kVA) et une puissance de crête d'une heure de 300 kVA. Le conteneur s'organisait initialement en trois compartiments distincts : la pile à

combustible au centre, la conversion électrique d'un côté et le système de refroidissement de l'autre.

- **GEN-Z 300 (Nouvelle version compacte en conteneur de 13 pieds) :** Présente les mêmes performances électriques (300 kW nominal) mais intègre une compacité optimisée avec des dimensions de 4,06 m de longueur, 2,44 m de largeur et 2,59 m de hauteur, pour un poids total d'environ 8 000 kg. Le système de refroidissement est positionné directement au-dessus de la pile à combustible, simplifiant la maintenance et l'intégration. Cette version intègre également des supercondensateurs pour absorber les appels de charge dynamiques de l'ordre de quelques millisecondes.

- **GEN-Z 600 :** Évolution future dotée d'une puissance de 600 kW (600 kVA), intégrant deux piles à combustible pour délivrer une puissance nominale de 400 kW et une puissance de crête de 600 kVA.

Sur le plan des performances thermodynamiques, le système affiche une efficacité électrique nominale de 54 % au démarrage, ce qui surpasse les standards du marché. L'intégration d'un système de cogénération permet de récupérer l'énergie thermique sous forme d'eau chaude à environ 80 °C, portant l'efficacité globale du système à plus de 80 %. Le générateur fonctionne dans une plage de température extérieure comprise entre -20 °C et +40 °C, avec un niveau sonore inférieur à 70 dBA, et respecte les normes de certification CE ainsi que les standards IEC.

4. Comparaison technico-économique : Groupes électrogènes à hydrogène face aux groupes diesel

Les générateurs GEN-Z d'Inocel sont conçus pour remplacer directement les groupes électrogènes diesel traditionnels, dont la puissance moyenne sur les chantiers et sites industriels se situe entre 100 kVA et 500 kVA.

Une analyse comparative met en évidence les avantages significatifs de la technologie hydrogène :

- **Efficacité énergétique :** Alors qu'un générateur diesel standard présente une efficacité d'environ 31 %, le système GEN-Z atteint une efficacité d'environ 50 à 54 %, ce qui représente un gain d'efficacité de l'ordre de 20 % à un tiers supérieur.

- **Consommation de carburant :** Pour une puissance de 300 kW, le générateur consomme l'équivalent des flux d'hydrogène nécessaires, la consommation spécifique s'établissant à environ 12 kg d'hydrogène par heure pour une puissance de 200 kW.

- **Émissions évitées :** Pour une puissance nominale, le système évite l'émission d'environ 170 kg de CO2 par heure. Sur une base annuelle d'exploitation intensive, cela représente plus de 1 500 tonnes de CO2 évitées par an et plus de 2,8 kg d'oxydes d'azote évités par jour.

- **Coût d'investissement :** Le coût d'acquisition initial d'un générateur à hydrogène représente actuellement environ trois fois le prix d'un groupe diesel équivalent (un groupe diesel coûtant de l'ordre de 100 000 euros). Toutefois, l'évolution des volumes de production, la baisse du coût de l'hydrogène et les subventions publiques permettent de réduire progressivement cet écart.

5. Infrastructures industrielles, gigafactory de Belfort et écosystème R&D

L'outil industriel d'Inocel repose sur une organisation multisite structurée pour répondre à la montée en cadence de la production :

- **Grenoble (Siège social) :** Centre névralgique dédié à la R&D avancée, à la conception des piles à combustible et à l'exploitation des bancs d'essais pour la qualification et le contrôle qualité.

- **Cannes :** Site spécialisé dans le développement de systèmes avancés orientés vers les applications marines et de mobilité.

- **Belfort (Gigafactory) :** Gigafactory d'une superficie de 15 000 mètres carrés inaugurée pour assurer la production en série des piles à combustible et l'assemblage des générateurs.

La gigafactory de Belfort dispose d'une ligne de production inaugurée il y a deux ans, offrant une capacité nominale de fabrication de plus de 10 000 piles à combustible par an et plus de 100 générateurs par an. Le bâtiment a été dimensionné pour permettre l'installation de deux lignes de production supplémentaires, avec un objectif d'extension de la capacité de production à 90 MW d'ici 2027 et jusqu'à 3 GW à l'horizon 2032. Depuis un an, Inocel a internalisé l'ensemble des activités d'intégration, de design, de développement des auxiliaires et de fabrication des générateurs directement au sein de son usine, garantissant une maîtrise complète de la chaîne logistique et de la traçabilité par ERP.

6. Analyse des marchés cibles et contexte réglementaire : Le cas critique des Pays-Bas

La stratégie commerciale d'Inocel cible prioritairement les applications hors réseau, telles que les chantiers de construction, les îles, les micro-réseaux, le soutien aux réseaux électriques en période de congestion, ainsi que l'alimentation de secours pour les infrastructures critiques (hôpitaux, centres de données, grands sites industriels).

Les Pays-Bas constituent le marché précurseur incontesté en raison de la convergence de trois facteurs majeurs :

1. **Contraintes réglementaires environnementales :** Les Pays-Bas comptent plus de 160 zones protégées Natura 2000. Les réglementations strictes sur les dépôts d'azote interdisent l'utilisation de sources d'énergie émettrices de NOx ou de CO2 sur les chantiers situés à proximité de ces zones. L'utilisation d'un groupe diesel entraîne des amendes hebdomadaires et l'interdiction rapide d'exploitation du chantier. Cette réglementation s'étendra à de nouvelles municipalités à compter du 1er janvier 2028.

2. **Saturation structurelle des réseaux électriques :** Plus de 15 000 entreprises sont en file d'attente auprès des gestionnaires de réseau pour obtenir un raccordement ou une extension de puissance, avec des délais d'attente atteignant cinq à six ans. Les industriels et gestionnaires de parcs logistiques doivent impérativement recourir à des solutions de production temporaire ou permanente sur site.

3. **Politiques de subvention et soutien institutionnel :** Le gouvernement néerlandais subventionne activement l'acquisition de solutions de substitution au diesel via des programmes spécifiques comme le dispositif SSEB, qui couvre jusqu'à 25 % à 30 % du surcoût à l'achat d'un générateur à hydrogène.

Outre les Pays-Bas, le Royaume-Uni et les pays nordiques adoptent progressivement des exigences similaires dans leurs cahiers des charges d'appels d'offres publics, tandis que le marché français devrait suivre cette tendance à un horizon de deux à trois ans.

7. Logistique d'approvisionnement en hydrogène et partenariats stratégiques (CELYHANS / Equans)

L'un des défis majeurs pour le déploiement des générateurs stationnaires réside dans la logistique d'approvisionnement en hydrogène sur les sites d'utilisation. Pour répondre à cette contrainte, Inocel ne se positionne pas uniquement comme un fournisseur de matériel, mais propose une solution globale intégrée englobant l'approvisionnement en hydrogène.

À cette fin, Inocel s'appuie sur des partenariats stratégiques de premier plan, notamment avec le groupe Equans, à travers la structuration d'une offre conjointe sous la marque CELYHANS. Ce partenariat prend en charge l'ensemble de la chaîne de services : négociation des contrats d'approvisionnement auprès d'un réseau de producteurs d'hydrogène (au Royaume-Uni, en Espagne, aux Pays-Bas et dans les pays nordiques), sélection et fourniture des capacités de stockage mobiles, ainsi que l'installation, la mise en service et la maintenance préventive et curative sur site.

Sur le plan de la qualité du combustible, les générateurs utilisent de l'hydrogène de qualité conforme à la norme ISO 14687:2019 (Grade D). Si les clients privilégient à terme l'hydrogène vert, la disponibilité immédiate et la compétitivité tarifaire de l'hydrogène bas-carbone s'avèrent déterminantes pour sécuriser les premiers déploiements opérationnels.

8. Retours d'expérience sur le terrain, cas d'usage et robustesse environnementale

Les générateurs d'Inocel ont fait l'objet de déploiements opérationnels significatifs dans des conditions environnementales variées :

- **Chantier naval et industriel (Acciona - Espagne) :** Alimentation électrique d'une grue sur un chantier de construction navale côtier soumis à un environnement marin humide, salin et poussiéreux. Le système a cumulé plus de 130 heures d'exploitation effective sur une période de 13 semaines, délivrant plus de 7,2 MWh d'énergie et évitant l'émission de 80 tonnes de CO_2 ainsi que des polluants locaux.

- **Rallye Dakar (Arabie Saoudite - A.S.O.) :** Utilisation des générateurs en conditions extrêmes dans le désert, démontrant la robustesse des systèmes de filtration face à des concentrations massives de poussière et de sable.

- **Événementiel sportif (Alfred Dunhill Championship - Écosse) et applications de secours (Matmut - France) :** Fourniture d'énergie temporaire zéro émission pour des événements internationaux et des besoins de secours stationnaires.

Les retours d'exploitation confirment une haute autonomie de fonctionnement, un besoin de maintenance réduit grâce à l'espacement des remplacements de filtres, et une parfaite intégration des systèmes de sécurité multicouches.

9. Modèles économiques, commercialisation (CAPEX/OPEX) et services associés

Pour s'adapter aux stratégies financières des différents clients, Inocel propose deux modèles commerciaux distincts :

1. **Modèle d'achat (CAPEX) :** Investissement initial en capital pour l'acquisition de l'équipement avec transfert de propriété complet, assorti d'une garantie constructeur de deux ans et d'une option de contrat de maintenance pour l'optimisation des performances.

2. **Modèle de location (OPEX) :** Contrats de location flexibles s'étendant de quelques jours à plusieurs années, particulièrement adaptés aux chantiers temporaires et à l'événementiel, intégrant directement la maintenance, le support technique et l'assistance opérationnelle sans investissement initial lourd.

L'offre de services associée comprend la gestion logistique des transports, le respect des réglementations de sécurité, l'analyse des risques, l'installation par des techniciens spécialisés en une journée, ainsi qu'un système de supervision télémétrique à distance permettant aux clients de suivre en temps réel la production d'énergie, l'efficacité, la consommation d'hydrogène et de déclencher une maintenance prédictive.

10. Recommandations stratégiques et institutionnelles pour l'échelle européenne

À l'issue de sa présentation, Inocel a formulé quatre recommandations majeures à l'attention des décideurs politiques européens et nationaux pour accélérer le déploiement de l'hydrogène dans la production d'énergie décentralisée :

1. **Reconnaître l'hydrogène stationnaire comme un usage stratégique :** Intégrer formellement la production d'électricité temporaire et stationnaire dans les politiques de soutien de la demande européenne, en imposant des exigences technologiques neutres et zéro émission dans les marchés publics.

2. **Soutenir la logistique du « dernier kilomètre » :** Étendre les politiques d'infrastructures au-delà des grands gazoducs de transport pour rendre éligibles au financement européen les actifs logistiques mobiles.

3. **Réorienter une partie du soutien public vers la consommation :** Compléter les aides existantes axées sur la production amont par des mécanismes de soutien temporaire à l'offtake pour les applications stationnaires.

4. **Créer un groupe de travail européen « H2 pour l'énergie » :** Fédérer les fabricants de piles à combustible, les loueurs de matériel, les entreprises de construction, les fournisseurs de gaz et les autorités publiques au sein d'une instance dédiée pour harmoniser les réglementations techniques à travers l'Europe.

Visite du site de production d'hydrogène vert Lhyfe en Grésivaudan

1. Introduction et contexte stratégique

1.1 Présentation de l'intervenant et du site

La prise de parole technique s'est déroulée sur le site industriel de Lhyfe situé dans la vallée du Grésivaudan (Isère), sous la conduite d'Antoine Decout, responsable du développement commercial France chez Lhyfe, assisté de Gwen (responsable de site) et d'Olivier (responsable QSE).

Ce site constitue la plus grande unité de production d'hydrogène vert de France avec une capacité électrolytique installée de **10 MW**. Il est conçu pour atteindre une capacité maximale de production de **4 tonnes d'hydrogène vert par jour**.

1.2 Implantation géographique et écosystème territorial

L'implantation au sein de la région Auvergne-Rhône-Alpes répond à une triple exigence stratégique et industrielle :

1. **Soutien à la mobilité décarbonée** : Le site alimente directement le projet régional *Zero Emission Valley* (ZEV), qui compte déjà 12 stations de recharge en service. La moitié de la production du site (soit jusqu'à 2 tonnes/jour) est allouée aux besoins de la mobilité routière locale et transfrontalière (poids lourds transitant vers la Suisse et l'Italie).

2. **Ancrage dans la « Silicon Valley française »** : Située entre les massifs de la Chartreuse et de Belledonne, la vallée du Grésivaudan abrite un bassin microélectronique majeur (STMicroelectronics, Soitec) fortement consommateur d'hydrogène de haute pureté pour ses procédés de fabrication.

3. **Substitution dans les procédés thermiques industriels** : L'autre moitié de la production approvisionne les industriels sous contrat. À titre d'exemple, l'entreprise métallurgique Ugitech réalise des essais d'injection d'hydrogène vert en substitution du gaz naturel dans ses fours industriels.

2. Analyse de la chaîne de procédé d'électrolyse et sous-systèmes auxiliaires

2.1 Description du procédé

Le procédé global d'électrolyse et de traitement de l'hydrogène repose sur plusieurs étapes d'ingénierie et de transformation des fluides :

- **Pré-traitement de l'eau** : Prélèvement sur le réseau d'eau potable public et passage dans une unité de purification pour produire une eau ultrapure.

- **Conversion d'énergie** : Transformation du courant alternatif du réseau en courant continu basse tension et haute intensité via des redresseurs dédiés.

- **Électrolyse et réaction chimique** : Dissociation de la molécule d'eau (H_2O) au niveau des stacks sous une pression initiale de 40 bars.

- **Compression et analyse** : Élévation de la pression de l'hydrogène gazeux de 40 à 380 bars via des compresseurs dédiés, suivie d'un contrôle de pureté en ligne.

- **Conditionnement et logistique** : Remplissage direct des semi-remorques (*Tube Trailers*) à 380 bars.

2.2 Chaîne de transformation énergétique et d'électrolyse

Le site met en œuvre la technologie de membrane à échange de protons (**PEM - *Proton Exchange Membrane***) fournie par l'équipementier américain **Plug Power**.

- **Architecture modulaire** : La capacité totale de 10 MW est subdivisée en deux conteneurs d'électrolyse de 5 MW chacun.

- **Composants internes** : Chaque conteneur de 5 MW intègre **5 stacks d'électrolyse de 1 MW**.

- **Alimentation électrique** : Chaque brique d'électrolyse est couplée à un conteneur de redressement d'énergie dédié (*stack rectifier*), chargé de convertir le courant alternatif (AC) du réseau en courant continu (DC) haute intensité.

- **Traitements des réactifs (Eau)** : L'eau est prélevée directement sur le réseau d'eau potable public. Elle alimente un module de purification d'eau dédié par brique d'électrolyse afin d'atteindre un niveau d'eau ultrapure (déminéralisée/déionisée) indispensable pour éviter l'empoisonnement des membranes PEM.

2.3 Traitement des gaz, compression et stockage de transition

- **Pression de sortie d'électrolyse** : L'hydrogène sort directement des stacks à une pression intermédiaire de **40 bars**.

- **Compression haute pression** : Le site dispose de **3 compresseurs industriels** (abrités derrière des murs d'isolement phonique et sécuritaire) qui élèvent la pression de l'hydrogène de 40 bars à **380 bars**.

- **Absence de stockage tampon fixe (*Buffer*)** : Le site ne possède pas de capacités de stockage stationnaire tampon. Le gaz comprimé à 380 bars est directement envoyé vers la station de chargement des semi-remorques (*Tube Trailers*). La résilience logistique repose sur une flotte centralisée de **84 tube trailers** répartis sur les différents sites de production et bases logistiques de Lhyfe.

- **Gestion du coproduit Oxygène (O_2)** : L'oxygène généré par la réaction est actuellement libéré à l'atmosphère (*vented*). Faute de conduites dédiées et de logistique d'exportation adaptée sur les installations de cette taille, sa valorisation n'est pas rentable. Lhyfe envisage la revalorisation de l'oxygène sur ses futurs sites de très grande échelle (≥ 100 MW), comme le projet du Port du Havre, via un raccordement direct par pipeline avec des industriels locaux.

3. Sécurité, cadre réglementaire et réhabilitation du site

3.1 Gestion des risques industriels et consignes de sécurité

Le site étant en phase de tests de production et de mise en service (*commissioning*), des protocoles de sécurité stricts s'appliquent :

- **Zonage ATEX (Atmosphères Explosibles)** : Toute la zone de procédé est classée ATEX.
- **Équipements de Protection Individuelle (EPI)** : Le port d'EPI certifiés ATEX et de détecteurs de gaz portatifs individuels est obligatoire pour accéder aux zones techniques.
- **Point de rassemblement & Secourisme** : Un point de rassemblement (*muster point*) est matérialisé sur le parking extérieur, équipé d'un défibrillateur automatisé externe (DAE) et d'une trousse de premiers secours.

3.2 Génie civil et dépollution d'un site dégradé

Le site a été construit sur une ancienne décharge industrielle liée à la métallurgie/sidérurgie locale, abandonnée depuis le milieu des années 2010.

- **Nature des polluants** : Résidus minéraux non organiques (poussières de découpe et de transformation d'acier), excluant tout risque de génération de méthane de fermentation.
- **Travaux de confinement** : Afin d'empêcher la migration des polluants vers le cours d'eau adjacent, Lhyfe a mis en place un confinement par étanchéification et couverture de la masse de déchets en partenariat avec la société SLS. Cette dépollution préalable a permis l'obtention du permis d'aménager et de construire.
- **Planning de réalisation** :
    - Phase de développement et d'autorisations administratives : **1,5 an**.
    - Phase de construction du site : **2 ans** (initiée fin 2022).
    - Phase globale du projet : **4 ans** entre les premiers échanges et la mise en service.
    - Mise en service commerciale (*COD*) : prévue pour **décembre 2026**.

4. Modèle économique, sourcing énergétique et certification

4.1 Approvisionnement électrique et certification RFNBO

- **Contrats d'achat d'électricité (PPA)** : L'alimentation électrique est sécurisée via des contrats de long terme (*Power Purchase Agreements*) adossés à des parcs éoliens et centrales solaires photovoltaïques.
- **Certification RFNBO** : L'hydrogène produit répond aux critères d'exigence européens **RFNBO** (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin*).

- **Temporel de corrélation** : Les contraintes de télé-compensation et de corrélation temporelle s'appliquent actuellement à la maille **mensuelle**, ne posant pas de restriction sur la conduite d'élevage de charge. Le passage à une corrélation horaire stricte est anticipé à l'horizon 2030-2035.

4.2 Facteur de charge et services au réseau (*Grid Services*)

- **Montée en charge (*Ramp-up*)** : Le facteur de charge (*load factor*) varie selon la maturité des installations. Si le site pionnier de Bouin (Vendée, 1 MW alcalin) atteint **80 % à 90 %** de facteur de charge, les sites PEM plus récents sont encore en phase d'optimisation sur leur courbe d'apprentissage.

- **Flexibilité du réseau** : Lhyfe teste l'apport de services système auprès du gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE/TSO) pour générer des revenus de flexibilité complémentaire. L'objectif économique n'est pas de viser 100 % de facteur de charge, mais un point d'équilibre entre vente de molécules d'hydrogène et valorisation de l'effacement électrique.

5. Synthèse comparative du parc de production Lhyfe

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques clés des sites opérationnels et en développement mentionnés lors de la présentation :

Site / Localisation	**Puissance installée**	**Technologie d'électrolyse**	**Équipementier / Fournisseur**	**Statut & Année de mise en service**	**Application & Logistique**
Bouin (Vendée, FR)	1 MW	Alcaline	Nel	En production (depuis 2021)	Pionnier, facteur de charge 80–90 %
Occitanie (Toulouse, FR)	5 MW	PEM	Plug Power	En production (depuis ~2024)	Mobilité & industrie régionale
Bretagne (Morbihan, FR)	5 MW	PEM	Plug Power	En production (depuis ~2024)	Mobilité & industrie locale
Grenzach-Wyhlen (DE)	10 MW	PEM	Plug Power	En production	Marché allemand & transfrontalier

Site / Localisation	Puissance installée	Technologie d'électrolyse	Équipementier / Fournisseur	Statut & Année de mise en service	Application & Logistique
Grésivaudan (Isère, FR)	**10 MW (2 x 5 MW)**	**PEM**	**Plug Power**	**Commissioning (COD : Déc. 2026)**	**50 % ZEV (mobilité) / 50 % Industrie**
Le Havre (Seine-Maritime, FR)	100+ MW	En évaluation	Multi-fournisseurs	En développement	Raccordement direct par pipeline & oxygène

6. Conclusion et perspectives industrielles

La visite technique du site Lhyfe en Grésivaudan illustre le changement d'échelle de la filière hydrogène renouvelable en France. En passant de modules de 1 MW à des architectures réparties de 10 MW, Lhyfe valide son modèle de producteur-distributeur indépendant pure-player.

Les enseignements clés de cette présentation sont :

1. **Priorité à l'hydrogène gazeux comprimé (380 bars)** : Pas de liquéfaction sur site afin de maîtriser les coûts de process et de répondre aux standards dominants du marché.

2. **Modèle décentralisé en maillage (rayon de 200 km)** : Optimisation des flux logistiques routiers par *tube trailers*, avec des extensions ponctuelles au-delà en raison de la rareté de la molécule verte.

3. **Préparation du saut d'échelle (≥ 100 MW)** : Intégration future d'acteurs industriels lourds par canalisation directe et valorisation complète des coproduits (oxygène).

Visite de l'aciérie d'Ugitech

1. Contexte et présentation générale du groupe Swiss Steel et d'Ugitech

1.1. Organisation & Chiffres clés du groupe

Le groupe **Swiss Steel Group**, dont le siège social est situé à Emmenbrücke (Luzerne, Suisse), figure parmi les leaders mondiaux de la production, du façonnage et de la distribution d'aciers longs spéciaux. L'organisation s'appuie sur une structure internationale intégrée :

- **Ressources humaines** : Environ 7 000 collaborateurs répartis à travers le monde.
- **Réseau mondial** : 61 centres de vente et de services implantés dans 25 pays.
- **Portefeuille clients** : Plus de 18 500 clients actifs répartis sur l'ensemble des continents.

- **Structure financière et cotation** : À la suite d'une réorganisation stratégique de son actionnariat, le groupe est officiellement sorti de la bourse SIX Swiss Exchange depuis juin 2025.

Secteur d'Activité Client	Part du Chiffre d'Affaires (%)
Mobilité (Automobile, Transport)	39%
Génie Mécanique / Équipements	26%
Énergie (Pétrole, Gaz, Nucléaire, Éolien)	10%
Industrie Chimique & Pétrochimique	5%
Bâtiment & Construction	4%
Autres (Médical, Aéronautique, etc.)	16%

1.2. Filiales principales du groupe

L'appareil productif du groupe repose sur quatre entités industrielles majeures :

- **Deutsche Edelstahlwerke (DEW)** (Allemagne) : Spécialiste des aciers de construction mécanique et d'outillage.
- **Steeltec** (Suisse / Allemagne) : Expert en aciers étirés et solutions de haute précision à faible empreinte carbone.
- **Finkl Steel** (États-Unis / Canada) : Leader nord-américain des aciers pour moules et forgés de grandes dimensions.
- **Ugitech** (France / Italie / Allemagne) : Spécialiste mondial de référence dans le domaine des aciers inoxydables longs.

1.3. Positionnement commercial & Gamme de produits

Swiss Steel Group concentre ses activités sur trois familles de produits à haute valeur ajoutée : aciers de construction (*Engineering steels*), aciers pour outillage (*Tool steel*) et aciers inoxydables (*Stainless steels*).

Au sein de cet ensemble, **Ugitech se positionne à 100% sur le segment des aciers inoxydables**. Son catalogue comprend plus de 300 nuances d'acier inox normalisées ou brevetées, destinées aux applications les plus exigeantes (milieux corrosifs, aéronautique, implants médicaux, connectique haute précision).

1.4. Ugitech en chiffres

- **Siège social** : Ugine (Savoie, France).
- **Effectifs** : 1 582 salariés en contrat à durée indéterminée (hors effectifs intérimaires).
- **Empreinte industrielle** : 10 sites de production, de transformation et de parfillage stratégiquement répartis :
    - *France* : Ugine, Grigny, Saint-Étienne, Bourg-en-Bresse, Brionne, Imphy.
    - *Italie* : Milan, San Vendemiano.

- *Allemagne* : Reichshof (Sprint Metal SMEZ), Hemer.

- **Recherche & Développement** : Un centre de recherche dédié comptant 47 chercheurs et ingénieurs.
- **Base clients directes** : Environ 3 000 clients industriels.

1.5. Engagements RSE et Certifications

- **SBTi (Science Based Targets initiative)** : Revalidation formelle des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) alignés sur une trajectoire *Net-Zero*.
- **CDP (Carbon Disclosure Project)** : Évaluation annuelle des performances environnementales et de la transparence sur le changement climatique.
- **EcoVadis** : Obtention de la médaille **EcoVadis Platinum** en février 2026, plaçant Ugitech dans le Top 1% des entreprises mondiales les plus performantes en matière de RSE.
- **Audits Tiers-Parti** : Vérification institutionnelle et certification complète des bilans d'émissions Scopes 1, 2 et 3 par l'organisme indépendant **DNV**.

2. Aperçu technique du procédé de fabrication d'acier inoxydable

2.1. Voie Électrique vs Voie Primaire

Contrairement à la filière primaire traditionnelle qui repose sur la réduction du minerai de fer par le coke de charbon dans un Haut Fourneau (HF/BOF), Ugitech exploite exclusivement la **filière de recyclage par Four à Arc Électrique (EAF)**. Ce choix technologique confère à l'acier produit un statut de matériau « vert par nature ».Filière Primaire (HF/BOF) : Minerai + Coke ——————————————▶ ~2 200 kg CO2/t

Moyenne Mondiale (Tous procédés) ——————————————▶ ~1 910 kg CO2/t

Swiss Steel Group (Moyenne EAF) ——————▶ ~195 kg CO2/t

Steeltec (EAF + Hydroélectricité) —▶ 45 kg CO2/t

Les intensités carbone ci-dessus sont exprimées en Scope 1+2 par tonne d'acier brut produite.

2.2. Description détaillée du flux de production à l'Aciérie

L'élaboration de l'acier inoxydable au sein du site d'Ugine suit un schéma métallurgique séquentiel rigoureux :

1. **Approvisionnement & Tri des matières premières** : Sélection rigoureuse de ferrailles d'acier et d'éléments d'alliages hautement qualifiés :
    - Nickel (Ni)
    - Chrome (Cr) à une teneur minimale de 10,5% (seuil de passivité de l'acier inox)
    - Molybdène (Mo), Cuivre (Cu), Manganèse (Mn)

    - Carbone (C) maintenu en dessous de 1,2%
2. **Fusion au Four Électrique à Arc (EAF)** :
    - Équipement : 2 fours électriques à arc de 50 tonnes de capacité chacun.
    - Procédé : Fusion des ferrailles sous l'action d'arcs électriques haute puissance.
    - Cadence : Durée de fusion d'environ 2 heures par coulée.
3. **Affinage au Convertisseur AOD (*Argon Oxygen Decarburization*)** :
    - Étape centrale de la métallurgie de l'acier inox.
    - Injection combinée d'oxygène, d'argon et d'azote pour décarburer le bain en fusion sans oxyder préférentiellement le chrome. Ajustement ultra-précis de la chimie du métal.
4. **Métallurgie en poche & Refonte sous Laitier Électro-conducteur (ESR)** :
    - Traitement en poche pour ajustement de la température, dégazage et inclusion de micro-alliages.
    - Pour les nuances ultra-propres destinées à l'aéronautique ou au médical, passage par un atelier de refonte ESR (*Electroslag Remelting*) afin d'éliminer les inclusions non métalliques.
5. **Coulée Continue** :
    - Transformation du métal liquide en semi-produits solides.
    - Obtention de **blooms** de section carrée de 205 x 205 mm, découpés à des longueurs d'environ 3,5 mètres, représentant une masse unitaire d'environ 1,12 tonne.

2.3. Laminoir à chaud et Transformations à froid

Le flux aval assure la mise au format final et le développement des propriétés mécaniques requises :

- **Four de réchauffage des blooms (Four K10)** :
    - Équipement industriel clé de 54 mètres de long à longerons mobiles.
    - Capacité nominale de production : 60 tonnes par heure.
    - Puissance thermique installée : 34 MW alimentés au gaz naturel.
    - Consommation énergétique : ~95 GWh par an.
    - Impact carbone direct : 16 000 à 19 000 tonnes de CO_2 par an (Scope 1).
- **Train de laminage à chaud** :
    - Déformation plastique successive via un train d'ébaucheur, un dégrossisseur, des blocs réducteurs/calibreurs Kocks 500 et 370, des blocs à fil haute vitesse, et des systèmes de bobineuses.
    - Traitements thermiques intégrés : Lignes de recuit et de trempe en ligne pour fixer la microstructure cristalline.
- **Ateliers de parachèvement & Transformation à froid** :
    - Opérations de finition : Tournage, rectification, chromage, étirage.
    - Tréfilage avancé : Unité Sprint Metal (SMEZ) à Reichshof pour la fabrication de fils ultra-fins, atelier de Brionne pour la confection de profils filtrants complexes.

3. Feuille de route de décarbonation et stratégie multi-leviers

3.1. Empreinte Carbone et Poids du Scope 3

À l'échelle mondiale, la sidérurgie est responsable de près de 8% des émissions globales de CO2, avec une moyenne sectorielle établie à 1,89 t CO2 par tonne d'acier.

Dans le cas spécifique d'Ugitech, l'utilisation du four à arc électrique réduit drastiquement les émissions directes (Scopes 1 et 2). Par conséquent, **le Scope 3 représente plus de 80% du bilan carbone global de l'entreprise**. Cet impact est principalement porté par l'extraction, la transformation et le transport des ferro-alliages amont (en particulier le nickel et le ferro-chrome).

3.2. Les 6 Piliers de la Stratégie Ugitech

1. **Diffusion, Communication & Certification** : Structuration des gammes d'acier bas carbone (*Green Steel*, *Climate+*, *Stainless+*) garantissant un taux de ferrailles recyclées supérieur à 95% et une traçabilité environnementale certifiée.
2. **Économie Circulaire (Projet Ugi'Ring)** : Déploiement d'une unité industrielle stratégique à La Léchère (Savoie) visant à traiter les déchets industriels complexes, les piles usagées, les catalyseurs et les poussières d'aciérie. Ce projet permet d'extraire et de recycler les ferro-alliages localement, garantissant la souveraineté industrielle et réduisant l'impact du Scope 3.
3. **Énergies Propres & Bas Carbone** : Électrification massive des procédés thermiques, remplacement progressif du gaz naturel par de l'hydrogène vert et du biométhane, souscription de contrats d'achat d'électricité renouvelable (PPA) et de Garanties d'Origine (GO).
4. **Efficacité Énergétique des Procédés** : Mise en œuvre de l'oxycombustion, installation de systèmes de récupération de chaleur fatale sur les fumées et les circuits d'eau, renforcement de l'isolation thermique des fours, et optimisation du pilotage de la production via un logiciel MES (*Manufacturing Execution System*).
5. **Mobilité Durable Interne & Externe** : Conversion de la flotte de chariots de manutention vers la pile à combustible à hydrogène, développement du ferroutage pour le transport de marchandises, et incitations au covoiturage pour les salariés.
6. **Innovation & Financements Structurants** : Participation active aux programmes de recherche européens (ex: RFCS - *Research Fund for Coal and Steel*) et levée de subventions publiques (ADEME, France 2030).

3.3. Trajectoires SBTi (Near-Term 2030 et Net-Zero)

Afin de respecter les accords de Paris, Ugitech s'est fixé des jalons de réduction chiffrés et audités :

Horizon Temporel	Périmètre Émissions	Objectif de Réduction (vs Année de référence)
Near-Term 2030	Scope 1 & 3 (Fusion et Formage à chaud)	**- 23,7%**
Near-Term 2030	Scope 1 & 2 (Traitement thermique et Finition)	**- 42,0%**
Near-Term 2030	Scope 3 (Global amont)	**- 25,0%**
Jalon 2038	Scopes 1, 2 & 3	**- 77,7%**
Net-Zero 2050	Scopes 1, 2 & 3	**- 90,0%** (avec compensation du solde résiduel)

4. Projet d'électrification et hybridation du four de réchauffage (four K10)

4.1. Architecture du Four K10 (54m)

Le four K10 assure la montée en température des blooms à plus de 1 200°C avant leur laminage. Il est découpé longitudinalement en 5 zones thermiques fonctionnelles :

Zone 0 (16m)	Zone 1 (10m)	Zone 2 (10m)	Zone 3 (9m)	Zone 4 (9m)
Préchauffage	Chauffe	Chauffe	Égalisation	Maintien
Sans brûleurs	10 x 1,1 MW	10 x 1,1 MW	8 x 750 kW	15 x 300 kW

4.2. Concept d'Électrification des Zones 1 et 2

Le projet d'ingénierie vise à remplacer la combustion d'énergie fossile dans les zones centrales de chauffe par de l'énergie électrique :

- **Technologie intégrée** : Implantation de résistances électriques suspendues en voûte. Les éléments chauffants retenus sont constitués de **Disiliciure de Molybdène (MoSi2)**, capables de supporter des températures de rayonnement très élevées.
- **Puissance & Échelle** : Installation d'environ 600 éléments chauffants pour une puissance électrique totale installée de **12 MW**.
- **Bénéfice Environnemental Direct** : Réduction estimée de **7 500 à 16 000 tonnes de CO2/an** selon le taux d'utilisation et le facteur d'émission de l'électricité consommée.

4.3. Défis Techniques & Maintenance

SEUIL THERMIQUE DE CRITICITÉ

~1 200°C - 1 300°C ——————————————————▶ Limite MoSi2

1 315°C - 1 330°C ——————————————————▶ Maintien Gaz / H2 requis

1. **Limite thermique des matériaux chauffants** : Au-delà d'une température ambiante dans le four comprise entre 1 200°C et 1 300°C, les résistances en MoSi2 subissent un fluage accéléré, entraînant des déformations plastiques, des casses répétées et un coût de maintenance inacceptable. En conséquence, **l'électrification est cantonnée aux Zones 1 et 2**, tandis que les Zones 3 et 4 (requérant 1 315°C à 1 330°C pour le maintien) conservent un apport thermique par combustion (Gaz / Hydrogène).
2. **Cinématique et superstructure de maintenance** : Les éléments en MoSi2 sont extrêmement fragiles au choc mécanique. L'ingénierie a développé une superstructure mécanique permettant d'élever verticalement l'ensemble des grappes de résistances hors du four lors des arrêts techniques estivaux. Ce dispositif permet la réfection des bétons réfractaires par projection sans risquer d'endommager l'équipement électrique.
3. **Automatisations & Régulation hybride** : Développement d'un nouvel automate de contrôle-commande gérant le basculement dynamique et la répartition de la charge entre l'énergie électrique et la combustion gaz, garantissant une homogénéité thermique absolue des blooms quelles que soient les fluctuations de réseau.

5. Projet hydrogène européen "HYDREAMS" et démonstrateurs industriels

5.1. Présentation du Projet HYDREAMS

- **Cadre institutionnel** : Projet financé dans le cadre du programme européen **RFCS** (*Research Fund for Coal and Steel*).
- **Enveloppe financière** : Budget total de 8,5 millions d'euros, subventionné à hauteur d'environ 50% par la Commission Européenne.
- **Période d'exécution** : Du 1er avril 2023 au 30 septembre 2027.
- **Composition du consortium** :
    - **Ugitech** : Coordinateur global du projet et site d'expérimentation industrielle.
    - **DEW (Deutsche Edelstahlwerke)** : Partenaire industriel pour la validation sur aciers d'outillage.
    - **Messer** : Expert gazier, développement des brûleurs et ingénierie des skids de combustion.

- **Université de Graz (Institut de Thermique)** : Essais fondamentaux en laboratoire et caractérisation métallurgique.
- **Genvia** : Fournisseur de technologies d'électrolyseurs haute température à oxyde solide (SOEC).
- **Calderys** : Développeur et fabricant des revêtements réfractaires de nouvelle génération.
- **Alias** : Modélisation numérique, simulations thermiques et mécanique des fluides numérique (CFD).

5.2. Essais en Laboratoire (Université de Graz - Work Package 2)

Afin de valider l'impact de l'hydrogène sur la qualité de l'acier, des campagnes de tests poussées ont été menées à Graz :

- **Protocole expérimental** : Exposition de **13 nuances d'acier inox** représentatives à une température de 1 250°C pendant une durée de 200 minutes sous 4 atmosphères de combustion distinctes :
  a. Air + Gaz Naturel (Atmosphère de référence)
  b. Air + H2
  c. Oxygène + Gaz Naturel (Oxycombustion)
  d. Oxygène + H2 (Oxycombustion 100% Hydrogène)
- **Résultats & Conclusions métallurgiques** :
  - **Décarburation** : Aucune décarburation de la sous-couche métallique constatée.
  - **Structure de la calamine** : La nature chimique et la cristallographie des couches d'oxydes formées ne montrent aucune altération préjudiciable.
  - **Cinétique d'oxydation** : L'épaisseur absolue de la couche de calamine augmente en présence d'oxycombustion et d'hydrogène pur, en raison de la concentration de 100% de vapeur d'eau (H2O) dans l'atmosphère du four.
  - **Décalaminage** : Les essais de nettoyabilité mécanique et hydraulique haute pression ont confirmé que la calamine ainsi formée s'élimine parfaitement, sans générer de défauts de surface sur le produit laminé.

5.3. Projet d'Oxycombustion / Enrichissement en O2 (Démonstrateur 2 - Four K10)

En parallèle de l'hydrogène, l'enrichissement en oxygène de l'air de combustion a été testé directement sur le four K10 :

- **Principe** : Injection ciblée d'oxygène pur pour augmenter le taux d' O2 dans l'air comburant de 21% (air standard) jusqu'à des niveaux compris entre 22% et 25%.
- **Résultats énergétiques mesurés** :

Taux d'enrichissement en O2	Gain mesuré en Gaz Naturel

21,76% O2 —▶ - 1,3%

22,78% O2 —▶ - 2,8%

25,00% O2 —▶ - 4,0%

5.4. Démonstrateur 1 - Four de Recuit Fil Machine (Ugine)

Ce démonstrateur, installé à partir de novembre 2026, constitue la première étape d'intégration de l'hydrogène à échelle industrielle réelle :

- **Caractéristiques du four** :
  - Puissance initiale de 770 kW, portée à **800 kW** après modification.
  - Fonctionnement par cycles continus d'une heure (étapes de maintien thermique puis de trempe).
- **Technologie de combustion** : Intégration du brûleur breveté développé par **Messer**. Ce brûleur est physiquement **100% flexible** et peut opérer indifféremment sous 4 modes sans aucun changement de pièce mécanique : Air/GN, Oxy/GN, Air/H2, Oxy/H2.
- **Logistique Hydrogène** :
  - Approvisionnement assuré par la société **Lhyfe** via des cadres de bouteilles / conteneurs d'une capacité unitaire de **200 kg d'H2 comprimé à 200 bar** à partir de février 2027.
  - Raccordement au four effectué au moyen d'une conduite dédiée de diamètre nominal DN20.
- **Sécurité & Adaptations réglementaires** :
  - *Détection de flamme* : La flamme issue de la combustion de l'hydrogène étant quasi invisible à l'œil nu, le système de sécurité intègre des détecteurs optiques ultraviolets (UV) spécifiques.
  - *Régulation* : Installation de skids de détente et de distribution de gaz étanches développés par Messer, accompagnés d'une révision complète de l'analyse fonctionnelle Hazop.

6. Analyse économique, compétitivité et enjeux énergétiques en europe

6.1. Défis OPEX vs CAPEX

La décarbonation des procédés sidérurgiques impose un changement complet de modèle économique :

- **L'équation économique défavorable** : Contrairement aux projets d'efficacité énergétique traditionnels, le passage à l'électricité de réseau ou à l'hydrogène vert se

traduit par une augmentation combinée du **CAPEX** (investissements lourds en équipements industriels) et de l'**OPEX** (coût de fonctionnement).

- **Le différentiel de coût de l'énergie** : À ce jour, le coût par MWh d'énergie électrique ou d'hydrogène reste très supérieur à celui du gaz naturel fossile.
- **Seuil de rentabilité** : En l'absence de mécanismes de soutien public dédiés à l'OPEX (ex: contrats d'écart compensatoire ou *Carbon Contracts for Difference - CCfD*), ces projets présentent un Retour sur Investissement (ROI) négatif selon les métriques financières conventionnelles.

6.2. Volatilité des Marchés Électriques

L'électrification industrielle expose directement les sites de production aux fluctuations extrêmes du marché spot de l'électricité :

- **Ampleur des variations** : Le marché européen a enregistré au cours des 24 derniers mois des écarts de prix violents, allant de **-420 €/MWh** lors de pics de surproduction renouvelable au printemps, jusqu'à **+300 €/MWh** pendant les périodes de tension estivales ou hivernales.
- **Stratégies de mitigation** :
    a. *Contractualisation à long terme* : Signature de contrats PPA (*Power Purchase Agreements*) pour sécuriser un prix de base lisible.
    b. *Flexibilité industrielle* : Implémentation d'équipements bi-énergie (électricité / gaz ou gaz / hydrogène) capables d'ajuster leur mode de consommation au pas horaire selon les signaux prix du réseau.

6.3. Concurrence Internationale & Mécanisme CBAM

La sidérurgie européenne évolue dans un marché mondial fortement concurrentiel :

- **Pression des importations** : Concurrence accrue en provenance de pays tiers (notamment la Chine et l'Inde) bénéficiant de coûts de main-d'œuvre bas et d'un accès à une énergie d'origine fossile peu coûteuse et non taxée.
- **Risque d'inversion technologique** : Danger que les concurrents asiatiques, forts de soutiens massifs à l'investissement, n'acquièrent une dominance sur les marchés de l'acier vert à bas coût avant les acteurs européens.
- **Rôle des politiques publiques** : Nécessité d'une mise en œuvre stricte du **Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (CBAM / MACF)** pour rétablir une concurrence équitable et éviter le risque de fuite de carbone.

6.4. Structure des Coûts de Production

La part directe de l'énergie thermique et électrique représente **environ 20% du coût de fabrication total** d'une tonne d'acier inoxydable (les 80% restants étant constitués de la masse salariale et, très majoritairement, pour environ 60%, de l'achat des ferro-alliages). Cette structure démontre que si le cadre réglementaire et tarifaire de l'énergie est stabilisé, la décarbonation complète de la transformation reste un objectif techniquement et économiquement atteignable pour l'industrie européenne.

7. Conclusion et recommandations stratégiques

7.1. Synthèse des avancées technologiques

Les démonstrations industrielles menées par Ugitech et le groupe Swiss Steel apportent la preuve formelle que la décarbonation de la sidérurgie lourde est techniquement réalisable. La combinaison du recyclage d'acier à 100% via la voie électrique, du projet d'économie circulaire Ugi'Ring, de l'électrification partielle du four K10 (12 MW MoSi2) et de l'intégration de l'hydrogène (projet *HYDREAMS*) constitue un modèle opérationnel complet.

La flexibilité et l'hybridation des équipements thermiques apparaissent comme le véritable pont technologique vers la neutralité carbone, permettant de concilier exigences métallurgiques, contraintes de maintenance et fluctuations énergétiques.

7.2. Recommandations pour les décideurs publics et industriels

1. **Soutien pérenne à l'OPEX** : Mettre en place d'urgence des mécanismes d'accompagnement financiers sur le coût de l'énergie bas carbone (dispositifs type CCfD) pour combler le différentiel de coût entre le gaz naturel et l'électricité/hydrogène vert.
2. **Développement des infrastructures réseau** : Accélérer le déploiement des infrastructures de transport et de distribution d'électricité haute tension et d'hydrogène à grande échelle pour sécuriser l'approvisionnement des sites industriels clés.
3. **Protection des marchés et souveraineté** : Garantir l'application rigoureuse du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (CBAM) pour protéger les investissements vertueux des producteurs européens face à la concurrence des produits acier à forte empreinte carbone.
4. **Valorisation des aciers bas carbone** : Normaliser la traçabilité de l'acier vert dans les marchés publics et la grande industrie (automobile, bâtiment) afin d'imposer un critère d'achat basé sur l'analyse de cycle de vie (ACV) globale.