



HYBRIDATION ENERGETIQUE DES PROCEDES INDUSTRIELS

juillet 2024

La réalisation de cette étude a été soutenue par l'ADEME (Agence de la transition écologique), le CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques) et le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques)

Étude réalisée pour le compte d'ALLICE par : François VIAL (CETIAT), Lauriane GIROUD (CETIAT)

Remerciements : Jean-Paul GOURLIA pour sa contribution à l'étude.

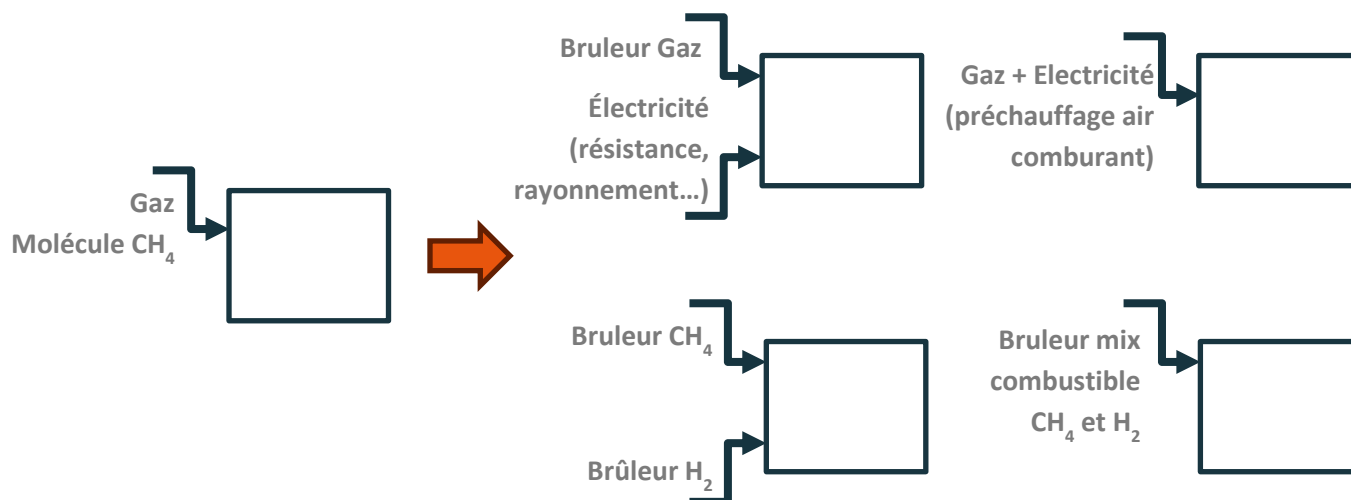
Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement d'ALLICE, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

RESUME EXECUTIF

1. Introduction

Les émissions du secteur industriel sont sur une tendance baissière, résultat des efforts de décarbonation menés par les industriels d'une part, et des prix de l'énergie élevés d'autre part. La pré-estimation du Citepa pour 2023 donne une baisse 9% dans les émissions de l'industrie. Parmi ces procédés industriels fortement émetteurs, certains sont difficilement décarbonables en raison de l'absence d'alternatives bas carbone compatibles avec ces procédés, ou d'un manque de disponibilité et de compétitivité de ces alternatives. C'est notamment le cas pour les hautes températures (au-delà de 300°C), avec par exemple les secteurs de la métallurgie, des matériaux et de la chimie. L'hybridation peut alors constituer une solution adaptée pour réduire les émissions de ces procédés. Cette étude se limite aux solutions d'hybridation :

- entre **le gaz naturel et l'électricité**, ou entre **le gaz naturel et l'hydrogène**.
- **directe**, c'est-à-dire que deux vecteurs énergétiques sont utilisés de manière immédiate et locale dans le processus de production, sans passer par des étapes intermédiaires de transformation ou de stockage importantes.



L'hybridation énergétique directe des procédés peut offrir divers avantages :

- Faciliter la montée en maturité et la compétitivité d'un vecteur énergétique en augmentant progressivement son taux d'incorporation.
- Réduire les émissions de carbone de la production afin de se conformer aux engagements pris, réglementations et contraintes en vigueur.
- Améliorer l'opérabilité des paramètres de production, au-delà des aspects énergétiques et de décarbonation.

2. Objectifs et méthodologie

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- pour les opérateurs industriels et prescripteurs, identifier des opportunités à court terme de projets de décarbonation via l'hybridation énergétique.
- pour les offreurs de solutions et prescripteurs, comprendre et mieux appréhender les couplages possibles de technologies et les besoins technologiques des secteurs clients.

L'étude est réalisée en deux parties. La première partie de l'étude comprend un état des lieux sur les solutions électriques et la chaîne de valeur de l'hydrogène bas carbone, ainsi qu'une description des procédés thermiques de secteurs difficilement décarbonables en raison des hautes températures nécessaires (au-delà de 300°C) : industrie des matériaux, de la métallurgie et de la chimie.

Dans un second temps, des études de cas sont réalisées afin d'évaluer l'intérêt technico-économique de l'hybridation :

Secteur industriel	Métallurgie	Matériaux	Chimie
Type d'équipement	Four de fusion d'aluminium	Four tunnel de cuisson briques et tuiles	Sécheur rotatif d'engrais
Hybridation considérée (et taux d'hybridation)	CH ₄ /H ₂ (de 7 à 25% d'H ₂)	CH ₄ /électricité via résistances (17%)	CH ₄ /électricité via : ➤ PAC pour rehausser la température issue de récupération de chaleur (15%) ➤ Résistances électriques (30%)

3. Résultats et conclusions

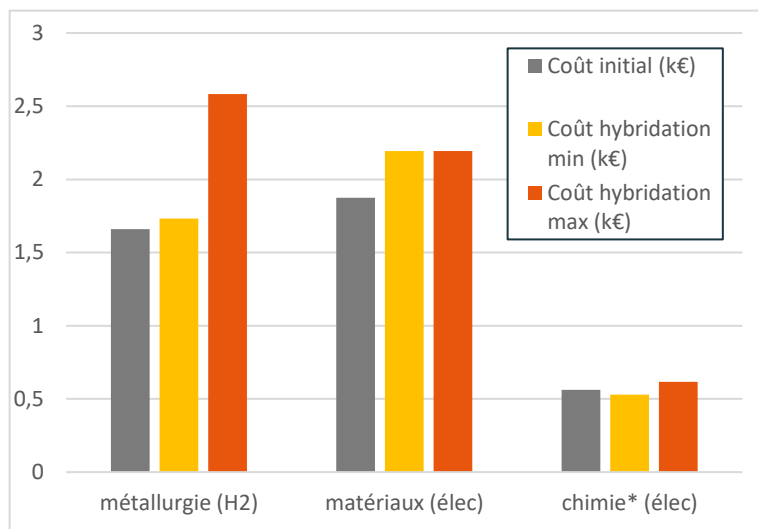
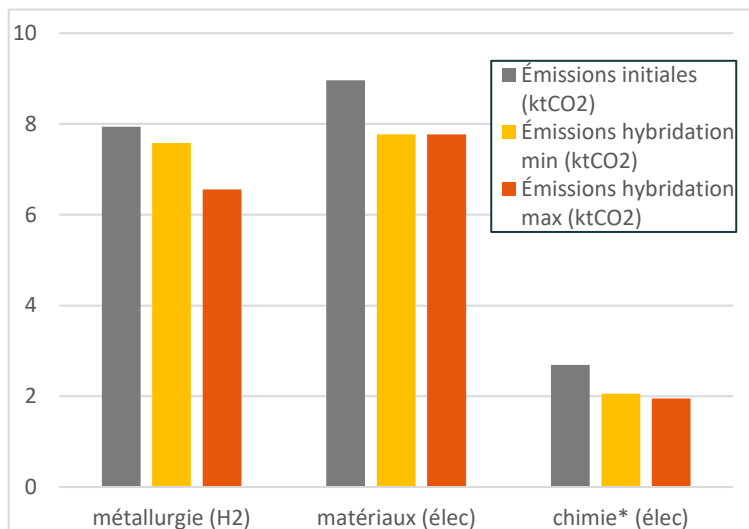
La première phase de l'état des lieux a révélé une documentation limitée sur l'hybridation énergétique des procédés. Cette phase a identifié les principales technologies d'électrification pour remplacer les combustibles fossiles : les résistances électriques, efficaces jusqu'à 1000 °C ; les pompes à chaleur et la compression mécanique de vapeur pour des températures inférieures à 200 °C ; le chauffage par conduction, utilisé notamment dans les fours verriers ; et l'induction, idéale pour la fonte des métaux. Concernant l'hydrogène bas carbone, sa production, son transport et sa distribution posent des défis majeurs de compétitivité, malgré le soutien des politiques publiques. Techniquement, les brûleurs actuels peuvent utiliser un mélange contenant 15 à 25 % d'hydrogène sans modifications majeures, mais des défis tels que la formation de NO_x, le stockage et les contraintes de sécurité persistent.

Les études de cas réalisées dans la deuxième phase de l'étude ont consisté à hybrider les procédés considérés via :

- l'injection d'hydrogène à un taux compatible pour les brûleurs du four de fusion,
- le réchauffage électrique de la zone avant feu du four de briques et tuiles,
- l'électrification par pompe à chaleur du sécheur pour améliorer la récupération de chaleur.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Ces hybridations assurent toutes la pérennité des procédés sans compromettre la qualité des produits finaux, l'hybridation agissant comme un complément énergétique, sans toutefois affecter le mécanisme de transfert de chaleur du procédé existant. Les taux d'hybridation étudiés varient de 6 à 30 %, permettant de réduire les émissions directes de CO₂ de 5 à 27 %, comme illustré ci-après.



Émissions et coûts annuels (OPEX + CAPEX annualisé) des études de cas dans le scénario France

**Note : pour le cas chimie, le cas d'hybridation minimum utilise la technologie PAC, et le cas d'hybridation maximum utilise la technologie des résistances électriques (à but comparatif).*

Du point de vue économique, les résultats obtenus sur le périmètre français montrent une augmentation de la facture pour les cas d'hybridation métallurgie et matériaux. Le coût plus élevé de la molécule H₂ bas carbone et de l'électricité implique une hausse de la facture énergétique, ces technologies n'améliorant pas significativement l'efficacité énergétique globale du four. En revanche l'électrification du sécheur via une PAC haute température permet à la fois de décarboner le procédé et de réduire la facture énergétique - le rendement énergétique de la PAC compense largement le coût plus élevé de l'électricité.

Pour le cas du four de fusion métallurgique, le scénario d'utilisation de l'hydrogène lorsque son coût est compétitif permet une faible réduction des émissions de CO₂, mais à moindre coût. C'est le seul scénario envisageable sans surcoût insurmontable, il ne nécessite pas de changement de brûleur, mais une automatisation du procédé en fonction des prix de l'énergie. La rentabilité peut être atteinte en considérant une baisse du coût de l'hydrogène bas carbone liée aux effets d'échelle ou des subventions pour sa production, couplée à une augmentation du prix du gaz et notamment de la taxe carbone.

Dans le cas du four tunnel, l'hybridation par résistances électriques reste limitée et non compétitive. La rentabilité peut être atteinte via un surcoût de type green premium¹ à la vente des produits, un mécanisme de subvention (par exemple un contrat pour différence carbone) ou bien une augmentation du prix du gaz par rapport à l'électricité.

¹ Surcoût acceptable par un client souhaitant bénéficier de produits avec une empreinte carbone réduite.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Concernant le sécheur rotatif, les performances de la PAC associées à la récupération de chaleur permettent au projet d'être rentable (même sans considérer de subventions), l'amortissement des investissements CAPEX étant très faible au regard des coûts énergétiques sur la durée de vie de 15 ans considérée.

En conclusion, le tableau ci-dessous reprend les principaux freins et leviers de l'hybridation énergétique directe des procédés industriels, via l'électricité et l'hydrogène. Ajoutons que ces énergies doivent être bas carbone, en considérant à la fois les étapes nécessaires à sa production et son acheminement.

Hybridation électrique	
Freins	Leviers
➤ Limitée par la capacité électrique des installations (production, transports, transformateurs...) ➤ Moins adaptée à des besoins ponctuels importants ➤ Technologies de chauffage convectif au-delà de 500°C peu utilisées et encore coûteuses (CAPEX, OPEX)	➤ Amélioration du rendement énergétique (pas de pertes fumées) ➤ Adaptée aux besoins continus (puissance de maintien en température) ➤ Offre une flexibilité et une adaptabilité aux marchés de l'énergie ➤ Bonne opérabilité
Hybridation hydrogène	
Freins	Leviers
➤ Coûts de production élevés, comparés au coût des énergies conventionnelles ➤ Stockage H2 de grande capacité encore peu développé ➤ Questionnements de la part des industriels quant à la durabilité des matériaux des fours exposés à des taux d'H2O élevés ➤ Qualité des produits garantie uniquement avec un taux H2 faible (pour l'instant)	➤ Bien adaptée aux fours industriels THT nécessitant un effet convectif soutenu (four verrier, four terre-cuite, four métallurgique de fusion) ➤ Chauffe rapide ➤ Homogénéité de température ➤ Ne nécessite pas de modifier l'équipement thermique existant ➤ Fours à durée de vie longue (20 à 40 ans), pas de modification de la qualité produit avec un taux H2 faible

SOMMAIRE

Résumé Exécutif	2
Sommaire	6
1. Contexte, objectifs et approche de l'étude.....	9
1.1. Contexte	9
1.2. Périmètre et objectifs de l'étude	10
1.3. Méthodologie de l'étude	14
2. Phase 1 : État des lieux de l'offre d'hybridation	15
2.1. Les solutions d'hybridation	15
2.2. Les procédés industriels difficilement électrifiables.....	28
3. Études de cas d'hybridation	46
3.1. Définition des études de cas	46
3.2. Cas 1 : Four de fusion pour la métallurgie (H2)	50
3.3. Cas 2 : Four tunnel le secteur matériaux (élec)	58
3.4. Cas 3 : Sécheur rotatif dans le secteur de la chimie (élec)	65
4. Synthèse	77
4.1. État des lieux.....	77
4.2. Etudes de cas	78
Acronymes.....	80
Bibliographie.....	81

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des différentes voies de productions de l'hydrogène	23
Tableau 2 : Principaux procédés de l'industrie chimique.....	41
Tableau 3 : Poids carbone des énergies utilisées pour les études de cas	49
Tableau 4 : Les coûts de l'énergie utilisés pour les 3 scénarios considérés (toutes taxes associées comprises, dont la taxe carbone – source Eurostat).....	49
Tableau 5 : Hypothèses de modélisation du cas de four métallurgique	51
Tableau 6 : Analyse technico-économique four hybridé H ₂	56
Tableau 7 : Hypothèses de modélisation du cas de four tunnel	59
Tableau 8 : Résumé des données de sortie du cas de référence et du cas d'hybridation four matériaux	62

Tableau 9 : Bilan des investissements du cas d'hybridation étudié pour l'étude de cas matériaux	63
Tableau 10 - Bilan financier de l'hybridation pour l'étude de cas matériaux	63
Tableau 11 : Poids carbone des pays des scénarios.....	64
Tableau 12 : Hypothèses de modélisation du cas de séchage	65
Tableau 13 : Résumé des données de sortie du cas de référence et des deux cas d'hybridations étudiés pour l'étude de cas chimie	73
Tableau 14 : Bilan financier pour l'étude de cas chimie (scénario 1, cas France).....	74
Tableau 15 - Bilan financier de l'hybridation PAC pour l'étude de cas chimie	74
Tableau 16 - Synthèse des freins et leviers de l'hybridation énergétique directe des procédés industriels	79

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Historique et projection des émissions du secteur de l'industrie entre 1990 et 2050 (enMtCO ₂ eq) [1]	9
Figure 2 : Consommation brute d'énergie du secteur industriel en TWh pour l'année 2020 d'après les données INSEE [5]	10
Figure 3 : Les cas d'hybridation étudiés	11
Figure 4 : Schéma des voies de production des gaz décarbonés [6].....	13
Figure 5 : Consommations des techniques électriques dans les procédés thermiques, gisement d'énergie substituable et induit par ces technologies, données CEREN sur l'année 2014 [7].....	16
Figure 6 : Part de la consommation de combustibles actuelle potentiellement électrifiables à horizon 2035 dans le secteur industriel français [2]	17
Figure 7 : Ratio de coût entre l'énergie électrique et le gaz en Europe [8]	19
Figure 8 : Répartition des consommations d'hydrogène par secteurs d'activité industriels en France et dans le monde, Source SIA Partners [10]	20
Figure 9 : Répartition des procédés de production d'hydrogène utilisé en France et dans le monde, Source SIA Partners [10].....	21
Figure 10 : Schéma du projet de démonstrateur industriel Jupiter 1000 [14].....	24
Figure 11 : Évolution des coûts de diverses technologies de production d'hydrogène, tels que pris en compte dans le modèle (en €/kgH ₂) [11].....	25
Figure 12 : Répartition de la consommation énergétique brute de l'industrie par sous-secteur et par vecteur énergétique [5].....	28
Figure 13 : Inventaire des émissions de GES annuels pour la production de produits minéraux [15] .	29
Figure 14 : Schéma du process de fabrication du ciment et répartition des émissions de CO ₂ en France [15]	30
Figure 15 : Schéma d'illustration d'hybridation électrique des fours verriers Owens Corning	32
Figure 16 : Schéma de fonctionnement des hauts fourneaux (source Géowiki) [18].....	34
Figure 17 : Les enjeux de décarbonation de la filière de production d'acier [19]	37
Figure 18 : Les différentes réactions de réduction de l'oxyde de Fer [20].....	38
Figure 19 : Les chiffres clefs du projet de production d'acier à basse émission de Dunkerque [20]....	38
Figure 20 : Consommations d'énergie de la Chimie en 2021, hors matière première des vapocraqueurs (TWh).....	41
Figure 21 : Répartition des émissions de CO ₂ par filière de production de la chimie	42
Figure 22 : Evolution des émissions de CO ₂ de la chimie depuis 1990.....	42

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE.
Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Figure 23 : Cartographie des projets de l'industrie chimique soutenus par France Relance (2023)	44
Figure 24 : Répartition des 240 TWh de consommation énergétique annuelle des usages thermiques non électriques, par procédés et par secteur (2014) [3]	47
Figure 25 : Schéma de la méthodologie des études de cas	48
Figure 26 : Illustration d'un four de fusion à chargement frontal.....	50
Figure 27 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du four métallurgique	51
Figure 28 : Evolution de la puissance du four pour un cycle de fusion	51
Figure 29 : Bilan énergétique du four (4000 kW)	52
Figure 30 : Schéma de principe de l'hybridation H ₂ à 25 %.....	54
Figure 31 : Schéma de principe de l'hybridation H ₂ à 50 %.....	54
Figure 32 : Schéma de fourniture H ₂ en période de production électrique à bas coût.....	55
Figure 33 : Illustration d'un four tunnel matériaux (source : ICV)	58
Figure 34 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du four métallurgique	59
Figure 35 : Schéma d'hybridation électrique du four tuiles et briques.....	60
Figure 36 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du four.....	61
Figure 37 : Graphique des coûts énergétiques annuels pour le cas de référence et solutions d'hybridation pour les 3 scénarios de coût énergétique	63
Figure 38 : Émissions de CO ₂ comparées par pays pour le cas du four matériaux.....	64
Figure 39 : Photo d'un sécheur à tambour rotatif (source : Lessine).....	65
Figure 40 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du cas chimie.....	66
Figure 41 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas initial.....	67
Figure 42 : Répartitions des puissances dissipées ou utiles mises en jeu dans le procédé de séchage pour le cas initial	67
Figure 43 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du procédé de séchage via une pompe à chaleur.....	69
Figure 44 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du procédé de séchage via des batteries électriques.....	70
Figure 45 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas d'hybridation par l'installation de batteries électriques.....	71
Figure 46 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas d'hybridation électrique par l'installation d'une PAC.....	71
Figure 47 : Répartitions des puissances dissipées ou utiles mises en jeux dans le procédé de séchage pour le cas d'hybridation avec mise en place d'une PAC.....	72
Figure 48 : Graphique des coûts énergétiques annuels pour le cas de référence et les deux solutions d'hybridation pour les 3 scénarios de coût énergétique	75
Figure 49 - Émissions et coûts annuels (OPEX + CAPEX annualisé) des études de cas dans le scénario France	78

1. Contexte, objectifs et approche de l'étude

1.1. Contexte

Cette étude ALLICE s'inscrit dans le contexte d'objectif de décarbonation mondiale, qui devient de plus en plus central et a pris de l'ampleur sur la dernière décennie. Le secteur industriel, qui sera traité dans ce rapport, représente environ 1/5 des émissions total de la France. C'est pourquoi il se présente comme un levier majeur dans la démarche et les objectifs ambitieux de décarbonation nationale.

Les objectifs nationaux en ce qui concerne la décarbonation ont été présentés en juillet 2017 dans la stratégie nationale bas carbone (SNBC) [1] qui donne la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle fixe pour cap la neutralité carbone dès 2050. Pour atteindre son but, la SNBC se décline en cinq orientations sectorielles pour traiter les principaux secteurs émetteurs qui sont le transport, le bâtiment, l'agriculture, l'industrie et la production d'énergie. Les projections pour le secteur de l'industrie sont présentées dans la Figure 1 ci-dessous.

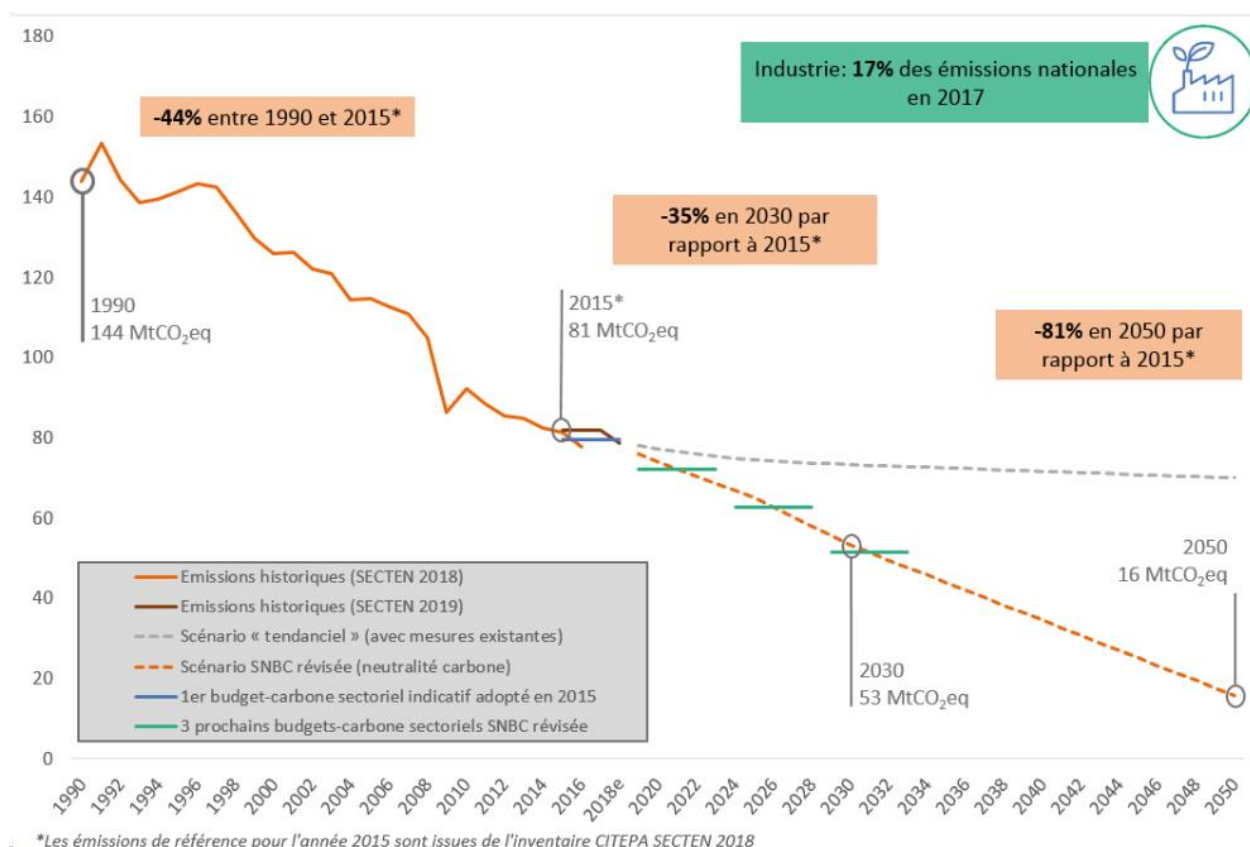


Figure 1 : Historique et projection des émissions du secteur de l'industrie entre 1990 et 2050 (enMtCO2eq)
[1]

Pour atteindre la réduction des émissions de -81% en 2050 dans l'industrie, les quatre axes de travail majeurs proposés sont les suivants :

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- Accompagnement des entreprises dans leur transition (financement public, recherche et innovation...)
- Développement de nouvelles filières énergétiques
- Réduction ou suppression des émissions des procédés industriels
- Forte amélioration de l'efficacité énergétique
- Maîtrise de la demande de matière (économie circulaire, recyclage ; écoconception...)

Cette étude s'inscrit également dans la continuité des études ALLICE réalisées en 2021 sur les potentiels d'électrification des procédés thermiques industriels (analyse technico-économique et enjeux marchés et réseaux) [2] [3]. Il s'agit de traiter les procédés industriels difficilement électrifiables en étudiant les solutions d'hybridations possibles.

La Figure 2 ci-dessous présente la répartition des consommations brute d'énergie (y compris l'usage des combustibles comme matière première dans les réactions chimiques) du secteur industriel (données INSEE [4]). Elle s'élève à 373 TWh pour l'année 2020. On note dans un premier temps que les combustibles dédiés aux procédés industriels représentent un peu plus de 40% des consommations global. Une deuxième partie du graphique présente la répartition des combustibles utilisés pour les procédés industriels. Le plus répandu est le gaz naturel ($\approx 40\%$), puis le charbon ($\approx 30\%$) et les produits pétroliers ($\approx 20\%$).

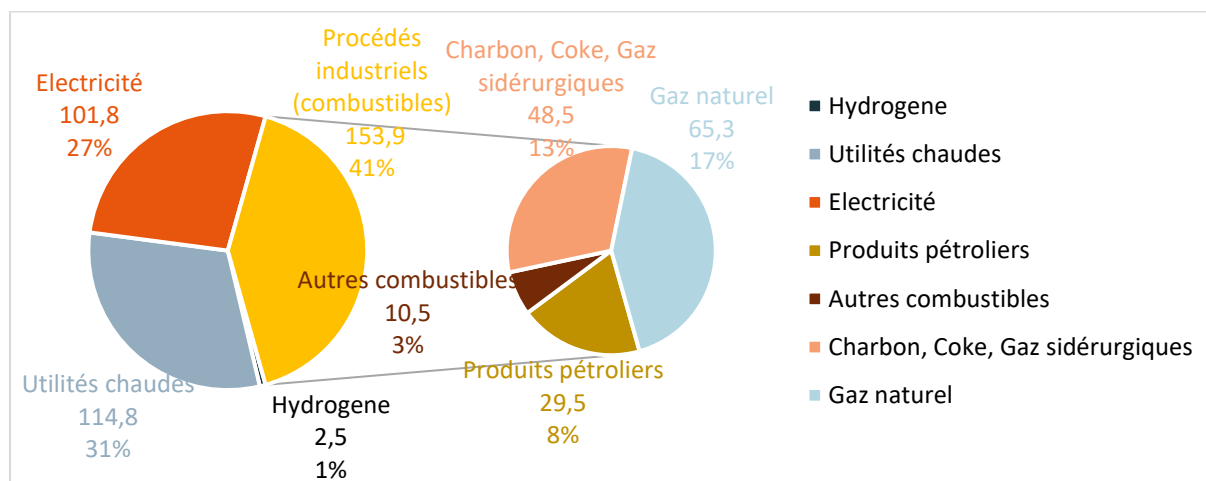


Figure 2 : Consommation brute d'énergie du secteur industriel en TWh pour l'année 2020 d'après les données INSEE [5]

1.2. Périmètre et objectifs de l'étude

1.2.1. Le périmètre

L'étude porte sur les procédés utilisant pour leur fonctionnement une énergie carbonée qui serait difficilement substituable par une énergie bas carbone (tel que l'électricité, la biomasse, le bio méthane, etc.) et où l'hybridation pourrait constituer une solution plus adaptée.

Ainsi, le périmètre se limitera aux cas suivants résumés dans la Figure 3 :

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- Des solutions **d'hybridation directe**. Ne seront pas envisagées dans ce rapport les solutions d'hybridation indirecte telles que le stockage ou les réseaux de distribution de fluides caloporteurs.
- Des cas d'hybridation entre le gaz naturel et l'**électricité** ou entre le gaz naturel et l'**hydrogène**. Bien que l'ensemble des procédés industriels difficilement électrifiables sont abordés, seuls ceux utilisant du gaz naturel en combustible seront développés lors des études de cas.
- Des secteurs industriels à faible électrification potentielle. Sont ciblé en priorité les secteurs dont les procédés en jeu présentent des températures élevées tels que la chimie, les matériaux minéraux non métalliques et la métallurgie.

Cette étude s'intéressera aux technologies d'hybridation électrique ou hydrogène disponibles ou en devenir. Elle n'a pas pour vocation de développer les solutions de production d'hydrogène ou d'électricité décarbonée. Elle part du constat que l'offre électrique française est déjà grandement décarbonée et que l'offre d'hydrogène vert est en cours de développement et s'impose comme un levier pour atteindre l'objectif de neutralité carbone national.

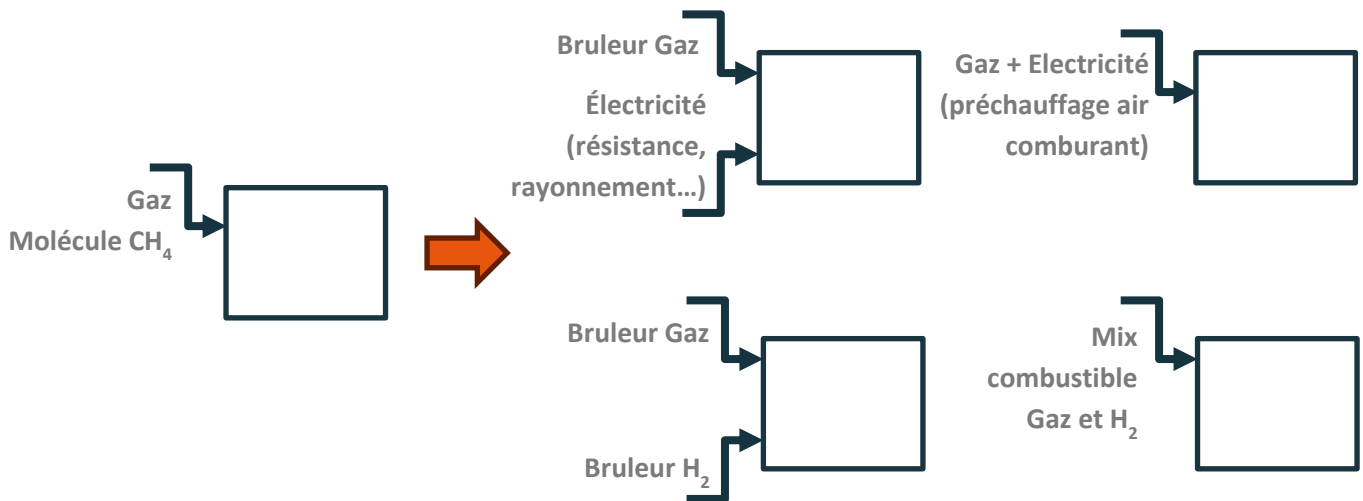


Figure 3 : Les cas d'hybridation étudiés

1.2.2. Les objectifs

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Identifier les opportunités à court terme de projets de décarbonation via l'hybridation énergétique
- Comprendre et mieux appréhender les couplages possibles de technologies et les besoins technologiques
- Informer sur les obstacles technologiques et économiques des techniques d'hybridation

1.2.3. Les gaz décarbonés dans l'industrie

Comme précisé lors de la définition du périmètre de l'étude, les solutions d'hybridations qui seront considérées ne prendront en compte que deux vecteurs énergétiques qui sont l'électricité et l'hydrogène. Cependant, il est intéressant de noter que d'autres gaz décarbonés peuvent également être substitués au gaz naturel dans un but de décarbonation. Une étude ALLICE a déjà permis de définir le potentiel d'intégration des gaz décarbonés en industrie [6]. Cette partie propose uniquement un rappel des solutions de gaz décarbonés disponibles afin de mieux définir le cadre de l'étude.

Le **Biogaz** est produit par un processus de méthanisation qui permet de valoriser la matière organique humide. Il est composé principalement de CH_4 et de CO_2 et présente un PCI généralement compris entre **5 et 7 kWh/Nm³**

Le **Biométhane** provient du processus d'épuration du biogaz. Il consiste à extraire le CO_2 afin d'obtenir un gaz suffisamment pur pour être injecté sur les réseaux sans contraintes. Il est composé de CH_4 à plus de 97% et présente un PCI autour de **10 kWh/Nm³**.

Le gaz de synthèse, ou **Syngaz** est produit à partir de la gazéification de matière organique ligneuse (charbon, biomasse ou déchets solides). Il est composé principalement de CH_4 , de CO , de H_2 et de CO_2 dans des proportions variables. De même, son PCI varie suivant sa composition **entre 1 et 5 kWh/Nm³**.

Le **méthane de synthèse** est issu d'un procédé de méthanisation qui consiste à faire réagir des molécules de CO_2 ou de CO avec de l' H_2 dans des conditions spécifiques. Comme le biométhane, il peut également être injecté sur les réseaux sans contraintes. Il est composé de CH_4 à plus de 97% et présente un PCI autour de **10 kWh/Nm³**.

L'**hydrogène** est produit par l'électrolyse de l'eau (H_2 décarboné) ou par le vaporeformage du méthane (H_2 carboné). Il est composé à 100 % de H_2 et présente un PCI de **3 kWh/ Nm³** ou de 33 kWh/kg.

Les **gaz de récupération** sont les gaz résultants des réactions mises en jeux dans les procédés industriels. Ils comprennent notamment les COV et les gaz de hauts fourneaux. Leur composition et PCI sont variés.

La Figure 4 ci-dessous résume les différents gaz décarbonés disponibles et leurs voies de productions. Cette étude s'intéresse donc à l'hybridation des procédés fonctionnant avec du gaz naturel ou toute autre molécule de méthane (biométhane ou méthane de synthèse). En revanche, elle n'abordera pas les solutions d'hybridation qui intègrent des gaz décarbonés tels que le biogaz, les Syngaz ou les gaz de récupération tel que défini ci-dessus. Ces solutions ont déjà été traitées dans le rapport ALLICE sur le potentiel d'intégration des gaz décarbonés en industrie [6]. Seule l'intégration de l'hydrogène est prévue dans le scope de l'étude.

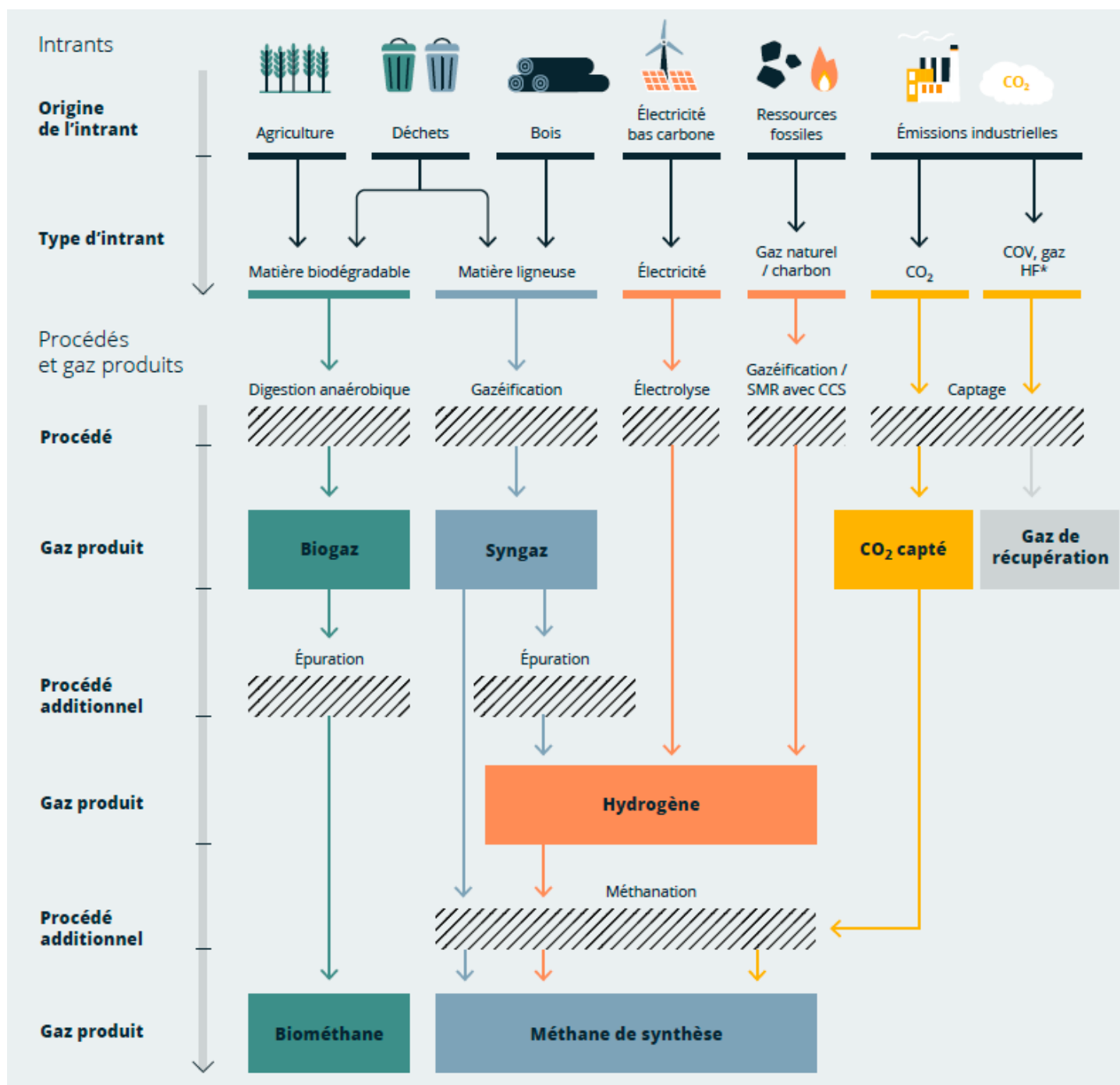


Figure 4 : Schéma des voies de production des gaz décarbonés [6]

1.3. Méthodologie de l'étude

L'étude comporte trois phases décrites ci-après :

Phase 1 : Réalisation de l'état des lieux des solutions, les offres existantes et les enjeux technologiques

- Etat des lieux des solutions d'électrifications disponibles
- Etat des lieux du marché de l'hydrogène en France, les usages, les moyens de production de distributions et ses enjeux technologiques
- Identification des process difficilement électrifiables pour les 3 secteurs de la chimie, des matériaux et de la métallurgie
- Les solutions d'hybridations déjà existantes, exemples de projets.

Phase 2 : Cette phase est consacrée à la réalisation de 3 études de cas.

- Hybridation d'un four de fusion batch au gaz naturel avec de l'hydrogène
- Hybridation électrique d'un four tunnel tuiles et briques
- Hybridation par électrification et valorisation des buées d'un séchoir avec relève de température par une PAC

Phase 3 : Analyse et conclusions de l'étude

- Identification des opportunités de projets de décarbonation
- Identification des enjeux technologiques
- Les limites de l'étude et les pistes pour de futures études

2. Phase 1 : État des lieux de l'offre d'hybridation

Cette section vise à identifier :

- Les solutions d'électrifications matures ou en devenir
- Les solutions de fourniture d'hydrogène
- Les contraintes et enjeux de l'utilisation de l'hydrogène
- Les secteurs et procédés difficilement décarbonables/électrifiables
- Des exemples de projets d'hybridations

2.1. Les solutions d'hybridation

Dans un premier temps, un état des lieux a été réalisé afin de déterminer les solutions disponibles en termes d'hybridation afin d'apporter des moyens de décarbonation. Les deux solutions abordées dans ce rapport sont l'hybridation entre le gaz et l'hydrogène et entre le gaz et l'électricité.

2.1.1. Le vecteur électrique

2.1.1.1. Enjeux de décarbonation

Le vecteur électrique est un des piliers de la stratégie de décarbonation en France. La production d'électricité française étant peu carbonée, il en fait un atout majeur pour réduire les émissions du pays. C'est pourquoi la SNBC fixe comme objectif pour le secteur industriel une intensification de l'électrification des usages afin de passer de 25 % en 2015 à 70 % en 2050.

Pour mieux comprendre les enjeux du vecteur électrique et les solutions pour atteindre cet objectif ambitieux, il est intéressant de faire un point sur les différents modes d'électrification des usages actuellement disponibles et matures. La Figure 5 : Figure 5 ci-dessous présente des données CEREN de consommations électriques de l'année 2014 dédiée aux procédés thermiques. Elle détaille cette consommation par technologie et donne une estimation du potentiel d'intégration de chacune de ces technologies en substitution de combustible [7].

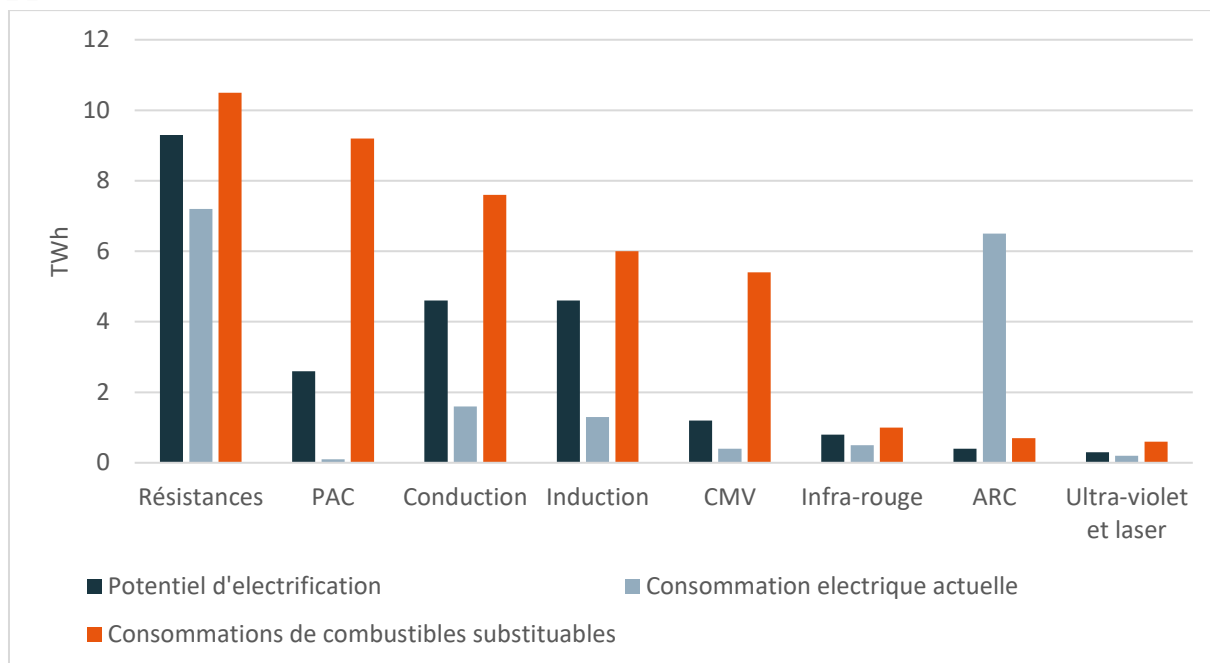


Figure 5 : Consommations des techniques électriques dans les procédés thermiques, gisement d'énergie substituable et induit par ces technologies, données CEREN sur l'année 2014 [7]

Le potentiel de combustibles substituable identifié au travers de technologies matures identifiées en 2014 s'élève à 42 TWh, sur une consommation d'énergie finale dédiée aux procédés thermiques dans l'industrie en 2014 de 250 TWh. Ce potentiel semble faible au vu des objectifs d'électrification fixés par la SNBC. Il apparaît donc que l'électrification du secteur industriel devra s'appuyer sur d'autres solutions (le développement de technologies de rupture, l'électrification indirecte, le changement de mode de production...).

De plus cette étude a été complétée en 2022 par l'étude ALLICE sur le potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels (PEP2) [2], qui affiche un potentiel technico-économique d'électrification du secteur industriel de 69 TWh à l'horizon 2035. Cette étude se base non seulement sur les technologies matures, mais également sur les solutions à l'état de R&D et dont la disponibilité est attendue d'ici 2035. Ainsi, les perspectives à 2035 montrent une forte évolution de 60 %, du potentiel d'électrification par le développement de nouvelles technologies. En particulier, le développement des pompes à chaleur haute température. Les conclusions de l'étude PEP 2 sont ainsi résumés ci-dessous Figure 6.

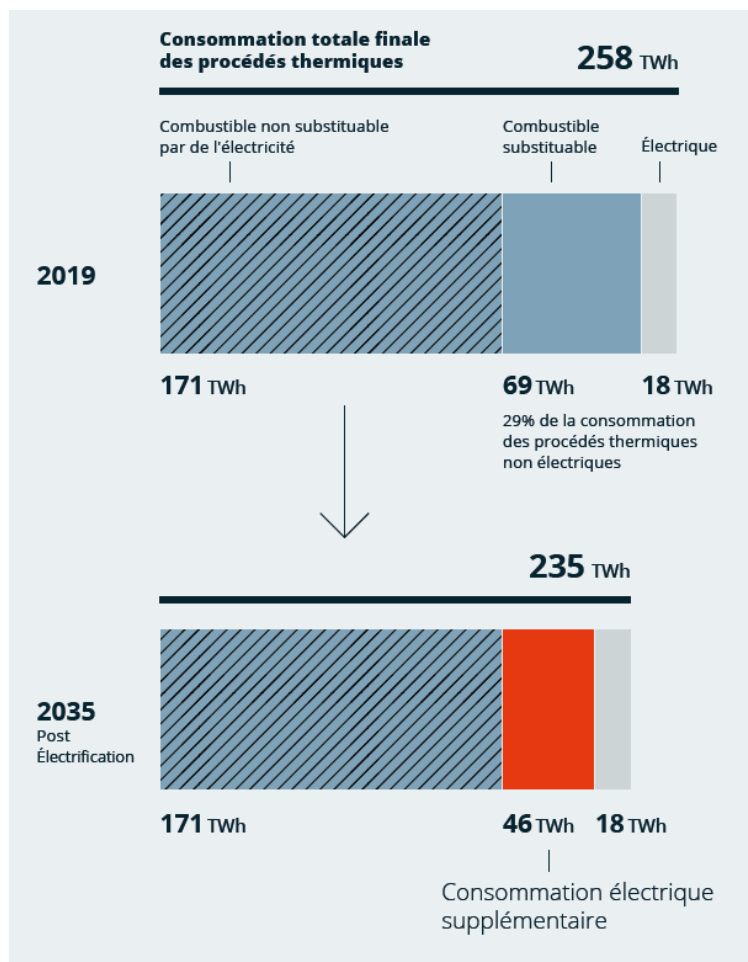


Figure 6 : Part de la consommation de combustibles actuelle potentiellement électrifiables à horizon 2035 dans le secteur industriel français [2]

2.1.1.2. Technologies électriques

Les principales technologies d'électrifications matures présentant un potentiel de substitution aux combustibles sont :

- **Les résistances électriques** : La chaleur est transmise par convection au fluide à chauffer (gaz, liquide). Cette technologie très mature présente le potentiel de substitution le plus important, car c'est la technologie la plus adaptable. Elle permet une large plage de température (jusqu'à plus de 1000 °C) et s'adapte à tout type de médias. C'est pourquoi elle peut s'appliquer à différents domaines et cas d'application.
- **La Pompe à Chaleur (PAC)** et la Compression mécanique de vapeur (CMV) sont deux technologies qui se rapprochent par plusieurs caractéristiques. Tout d'abord, leur domaine d'application se limite à des températures basses, inférieures à 200 °C. Le plus souvent elles vont s'appliquer sur des usages vapeur : production de vapeur pour la PAC et réduction des besoins vapeur pour la CMV. Les secteurs d'applications idéales seront donc la chimie, le papier ou l'agroalimentaire. Enfin, ces deux solutions techniques présentent l'avantage important d'afficher des efficacités élevées, comprises entre 300 % et 500 %. La technologie est très mature et développée en dessous de 100 °C. Au-dessus, les développements sont en cours avec de nombreux prototypes et démonstrateurs qui voient le jour à travers le monde.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- **La conductivité** : Cette technologie s'appuie sur les propriétés résistives d'un matériau afin de lui céder une puissance thermique. La chaleur est induite par une différence de potentiel appliqué sur les surfaces de la matière. La puissance transmise est proportionnelle à la résistivité du matériau. Le cas d'application le plus répandu est celui des fours verriers où cette technologie est déjà largement utilisée en appoint du chauffage au gaz.
- **L'induction** : Elle s'appuie sur les propriétés conductives d'un matériau, ce qui la rend particulièrement intéressante pour la fonte des métaux.

On observe que la technologie d'arc électrique présente un potentiel de substitution très faible. En revanche elle est déjà implantée.

Finalement, les solutions électriques décrites ci-dessus apparaissent adaptées aux procédés thermiques difficilement électrifiables en remplacement d'énergie fossile comme le gaz ou le fioul.

La conduction et la convection seront privilégiées pour des applications de fours de fusion. Les résistances électriques permettant d'atteindre des températures élevées pour réaliser des opérations de traitement thermique.

2.1.1.3. Freins à l'électrification

Il est à noter que ces technologies présentent des limites restreignant leurs usages. Le gaz reste encore largement utilisé dans les applications de four de fusion malgré que l'électrification progresse chaque jour avec de nouvelles technologies qui se développent.

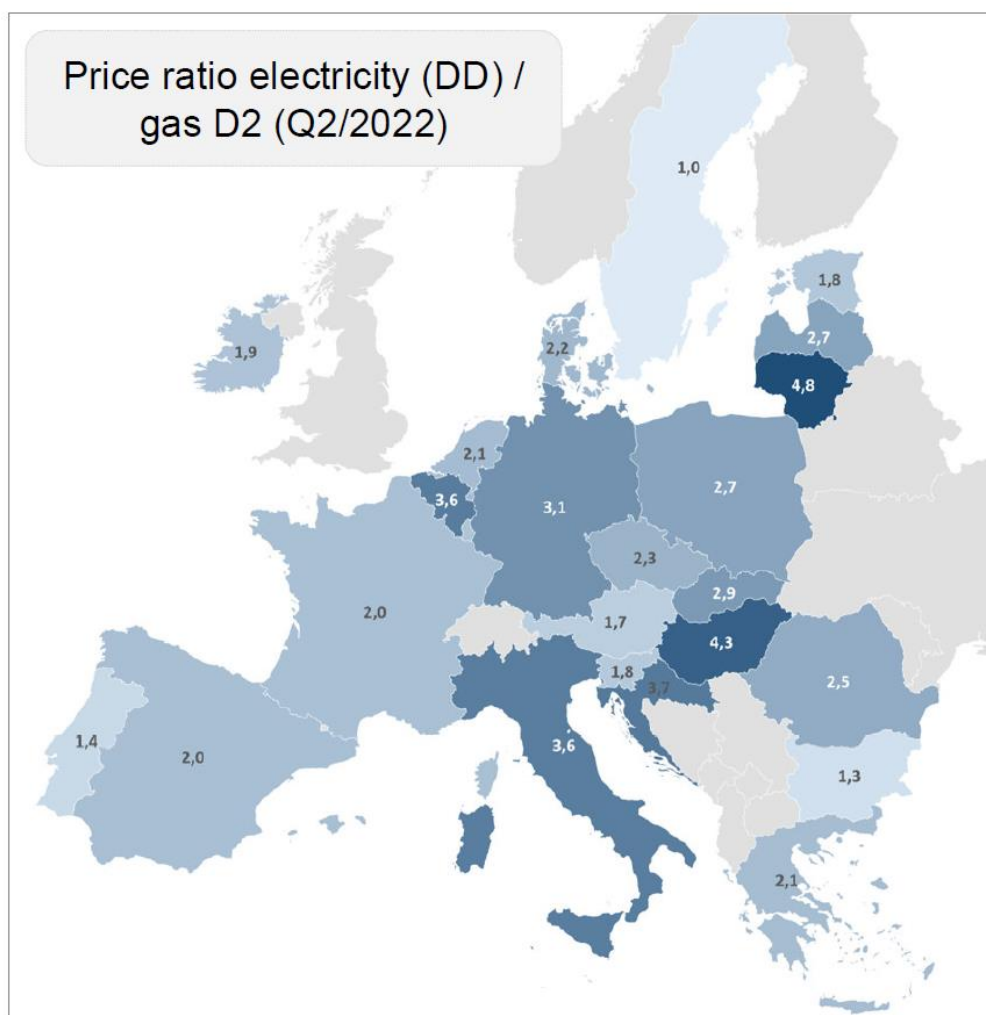
Les fours de fusion 100 % électriques ne sont pas adaptés pour tous les besoins. En particulier, les fours de grande capacité qui présentent des contraintes plus importantes pour le placement des résistances.

La technologie de conduction permet un transfert de puissance thermique important, mais plutôt en surface du métal à fondre. Ainsi, plus la masse de matière à traiter est importante, plus la diffusion au centre du four sera compliquée. De même pour l'induction, elle nécessite l'application d'un champ magnétique variable. Or plus le four est grand et plus le champ magnétique en son centre en sera réduit. Ainsi, l'électrification des fours de grande capacité nécessite le développement de nouvelles technologies sur le long terme pour pallier ses problématiques. En attendant, les solutions d'hybridations sont déjà matures et semblent un bon compromis pour amorcer une décarbonation.

La résistance électrique est une autre technologie d'électrification des procédés thermiques qui, malgré un fort potentiel de substitution des combustibles, présente des limites à son implantation. Il s'agit actuellement de la seule solution électrique mature qui permet de chauffer de l'air à des températures supérieures à 200 °C. Or l'air chaud est souvent nécessaire pour divers procédés industriels tels que les fours de traitement thermique comme les fours céramiques qui nécessitent des températures d'air allant jusqu'à 1 000 °C. L'air chaud est utilisé comme fluide caloporteur de transfert de chaleur. Mais pour permettre un transfert par convection, il est nécessaire d'avoir un brassage d'air suffisant. Malheureusement, les technologies de ventilateurs les plus récentes admettent un niveau de température limite qui se situe aux alentours de 500 °C. Ces procédés ont été conçus pour fonctionner avec du gaz. Il est possible que leur électrification à 100 % nécessite une modification profonde du procédé de fabrication.

Encore une fois, une hybridation électrique avec un préchauffage de l'air puis l'utilisation d'un combustible pour atteindre la température finale souhaitée est une première étape vers une décarbonation plus franche.

Enfin, il est important de noter que les contraintes technologiques à l'électrification ne sont pas le seul frein à son développement. Le contexte du marché de l'énergie joue également un rôle important. En effet, historiquement, le gaz a toujours été beaucoup moins cher que l'électricité. Cet écart a eu tendance à se réduire sur les dernières années, accentué par le marché de la taxe carbone qui ajoute un poids financier à la consommation de gaz. Malgré tout, l'électrification des procédés représente encore aujourd'hui un surcoût d'exploitation. À titre d'illustration, la Figure 7 donne à l'échelle européenne le ratio moyen entre le prix de l'énergie électrique et le prix du gaz.



Source: Öko-Institut based on Eurostat data

Figure 7 : Ratio de coût entre l'énergie électrique et le gaz en Europe [8]

2.1.2. Le vecteur hydrogène

Comme énoncé précédemment, le potentiel de substitution des procédés thermiques des combustibles à des solutions d'électrification directs représente 29 % de la consommation des procédés thermiques non électriques du secteur industriel à échéance 2035 [2]. Afin d'atteindre les objectifs ambitieux de la SNBC pour l'industrie, il sera nécessaire d'explorer d'autres solutions telles que l'électrification indirecte. Dans ce contexte, le développement de la filière hydrogène s'impose comme nécessaire. Le même constat est établi dans les travaux de prospectives pour la transition à horizon 2050 mené par l'ADEME [9]. Parmi les 4 scénarios proposés pour mener à la neutralité carbone de la France à horizon 2050, L'hydrogène est indispensable, avec une augmentation de sa consommation prévue pour entre 2019 et 2050 qui varie de x1.7 à x4.6 en fonction de la trajectoire choisie. L'augmentation de la consommation d'hydrogène devra bien évidemment s'accompagner également d'une évolution des modes de production vers des procédés bas carbone.

Pour mieux comprendre les enjeux de l'hybridation hydrogène, il est donc intéressant de poser dans un premier temps le contexte du marché de l'hydrogène en France. Quels sont les moyens de production, de distribution et qui sont les consommateurs ?

2.1.2.1. Le marché de l'hydrogène en France

À l'heure actuelle en France, l'hydrogène est utilisé très majoritairement en tant que matière première. Il est pour l'heure très peu utilisé dans les procédés thermiques industriels en tant que combustible. La Figure 8 ci-dessous présente les secteurs de consommations de l'hydrogène. Les deux secteurs les plus consommateurs sont le raffinage des produits pétroliers et la production d'ammoniac qui représente plus de 80 % de la consommation totale. Le secteur de la chimie présente également un besoin d'hydrogène à hauteur de 10 % de la consommation mondiale et Française.

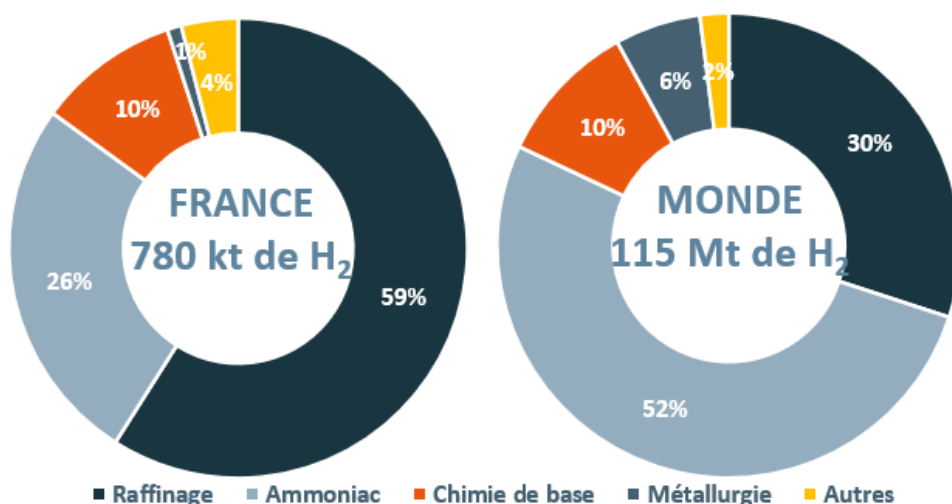


Figure 8 : Répartition des consommations d'hydrogène par secteurs d'activité industriels en France et dans le monde, Source SIA Partners [10]

La consommation totale d'hydrogène en France s'élève à 780 kilotonnes par an [11]. Une partie de cette production est directement issue de co-produits par des procédés de fabrication industriels qui

eux même consomment de l'hydrogène. En particulier les usines de raffinages ou de cokerie génèrent et autoconsomment de l'hydrogène, par les procédés qu'ils mettent en jeu. Quand il est présent en excédant, il peut également être ou revendu ou brûlé sur place pour être valorisé sous forme de chaleur ou d'électricité.

Cependant, les co-produits d'hydrogène issus de l'industrie française ne suffisent pas à répondre à l'ensemble du besoin. La production d'hydrogène dédiée comme matière première s'élève à 430 kilotonnes par an. En France, les procédés de production de l'hydrogène sont responsables de 11,5 millions de tonnes de CO₂ équivalent par an, soit environ 3 % des émissions totales de CO₂. La Figure 9 ci-dessous présente les différents modes de production en France et dans le monde. On remarque que notre part de production d'hydrogène par électrolyse est plus importante par rapport à la moyenne mondiale, mais elle reste très faible avec seulement 6 % de part production. Le reste est assuré par des énergies fossiles.

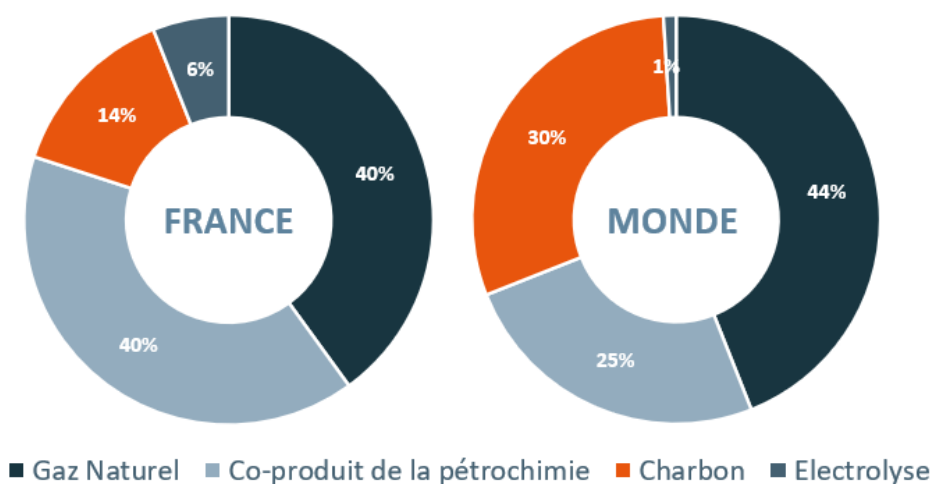


Figure 9 : Répartition des procédés de production d'hydrogène utilisés en France et dans le monde, Source SIA Partners [10]

Ce constat d'un marché de l'hydrogène très carboné met en évidence le besoin de développer une filière de production bas carbone pour espérer atteindre nos objectifs de décarbonation nationale. Actuellement les solutions technologiques existent, mais elles sont encore récentes et leur coût les rend encore très peu attractives. Pour permettre d'accélérer la décarbonation de la filière, l'état souhaite prendre des mesures fortes. Cela se traduit par la mise en place d'une stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène bas carbone en France [12]. Elle propose plusieurs axes de travail et s'accompagne de financements importants pour leur mise en place. On en retient les axes principaux suivants :

- Le remplacement de l'hydrogène fossile par une production décarbonée avec notamment un objectif de capacité de production électrolytique de 6.5 GW d'ici 2030 et 10 GW d'ici à 2035
- Le développement de nouveaux usages de consommation d'hydrogène
- L'aide à la compétitivité économique de l'hydrogène décarboné
- Le déploiement d'infrastructure de transport
- L'intégration d'une flexibilité des systèmes d'énergie avec le développement d'une capacité d'effacement et de stockage

2.1.2.2. Les solutions de production d'hydrogène décarboné.

Il existe plusieurs méthodes de production de l'hydrogène. Aujourd'hui les plus répandues sont des méthodes carbonées de reformage d'hydrocarbure ou de gazéification du charbon. L'hydrogène issu des combustibles fossile est dit hydrogène gris.

D'autres technologies existent pour permettre de produire de l'hydrogène moins carboné. La solution décarbonée la plus répandue est l'utilisation de l'électricité par un procédé d'électrolyse. Il existe plusieurs technologies d'électrolyseurs. Beaucoup de recherche et développement est réalisé dans le domaine afin de proposer des technologies plus performantes et permettre de meilleurs rendements. Les plus classiques sont les électrolyseurs alcalins, qui bénéficient d'une bonne maturité et d'un coût intéressant. Les électrolyseurs PEM proposent une quantité de courant plus élevée et une meilleure pureté de gaz. En revanche ils nécessitent des matériaux rares qui le rendent plus onéreux. Enfin, l'électrolyseur à haute température se base sur le fait qu'en augmentant la température de l'électrolyse, il est possible d'obtenir des rendements plus intéressants de l'ordre de 90 % contre 60 à 75 % pour les technologies alcalines ou PEM.

La production d'hydrogène par électrolyse peut être ou bas carbone dans le cas d'une consommation d'électricité qui provient du mix français ou décarboné en cas d'utilisation d'énergies renouvelables.

D'autres solutions de production d'hydrogène bas carbone existent. À commencer par l'exploitation d'hydrogène naturel contenu sous terre. Pour le moment les potentiels sont encore méconnus, mais des explorations ont été lancées afin d'avoir une première évaluation des gisements d'ici 2025.

L'utilisation de biométhane comme matière première ou le captage et stockage du carbone (CCS) pour les techniques de vaporeformage de méthane (SMR) sont également des solutions. Cependant ces technologies ne sont pas envisagées à grande échelle, car elles posent des problèmes de disponibilités en ressource de biométhane ou en sites de stockage de carbone. Cependant ces solutions peuvent être considérées comme des solutions complémentaires à la technologie plus classique d'électrolyse.

En particulier, l'intégration de la production d'hydrogène sur nos réseaux énergétiques présente un double intérêt de décarbonation de l'industrie et d'opportunité de stockage intermédiaire d'énergie. Cette nécessité de stockage et de flexibilité est d'autant plus pertinente que la pénétration des énergies renouvelables prendra une importance croissante. Le réseau d'hydrogène devra donc permettre une flexibilité, en intégrant une capacité d'effacement ou de stockage.

Le tableau ci-après résume les différentes voies de production d'hydrogène et la couleur qui lui est associée.

Tableau 1 : Résumé des différentes voies de productions de l'hydrogène

Couleur	Vecteur	Procédé	Dénomination
Noir	Charbon ou pétrole	Gazéification	Carboné ou fossile
Gris	Gaz naturel	SMR	Carboné ou fossile
Bleu	Gaz naturel	SMR avec CSC	Bas carbone
Turquoise	Gaz naturel	Pyrolyse	Bas carbone
Rose	Electricité nucléaire	Electrolyse	Bas carbone
Jaune	Mix électrique FR	Electrolyse	Bas carbone
Vert	Electricité ENR	Electrolyse	Renouvelable
Blanc	H2 à l'état naturel	NA	NA

2.1.2.3. Les usages compatibles avec une utilisation de l'hydrogène

Le développement d'une production et d'infrastructures de transport de l'hydrogène permettra dans un premier temps de décarboner les usages actuels d'hydrogène tels que les raffineries ou la production d'ammoniac. Mais le déploiement de tels efforts et investissement implique également un déploiement plus large. La disponibilité de l'hydrogène à un prix compétitif peut offrir des opportunités de décarbonation globale. En particulier dans l'industrie, le secteur de la sidérurgie représente le plus gros potentiel de décarbonation. En effet, la mise en place d'un processus de réduction direct des minéraux (DRI) couplés avec l'utilisation d'hydrogène comme agent réducteur, en remplacement des hauts fourneaux actuels, présente un potentiel de réduction des émissions de CO₂ colossal (estimé à 5.8 Mt de CO₂/an pour le projet de remplacement des hauts fourneaux de Dunkerque [14]).

La disponibilité de l'hydrogène peut aussi être une opportunité de décarbonation pour les procédés thermiques industriels. Il peut être valorisé de plusieurs manières :

- En combustion directe
- En mélange dans le réseau de gaz actuel, dans des proportions acceptables (inférieur à 20 %), afin de réduire le poids carbone du gaz réseau. Le projet GRHYD est un démonstrateur qui teste l'injection d'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable dans le réseau de distribution de gaz naturel.
- En produisant du méthane de synthèse à partir de l'hydrogène renouvelable et de CO₂ issu de procédés de CCS. Le projet Jupiter 1000 permet de tester ce procédé sur un démonstrateur industriel. Il a pour but de transformer l'électricité renouvelable en gaz pour pouvoir le stocker.

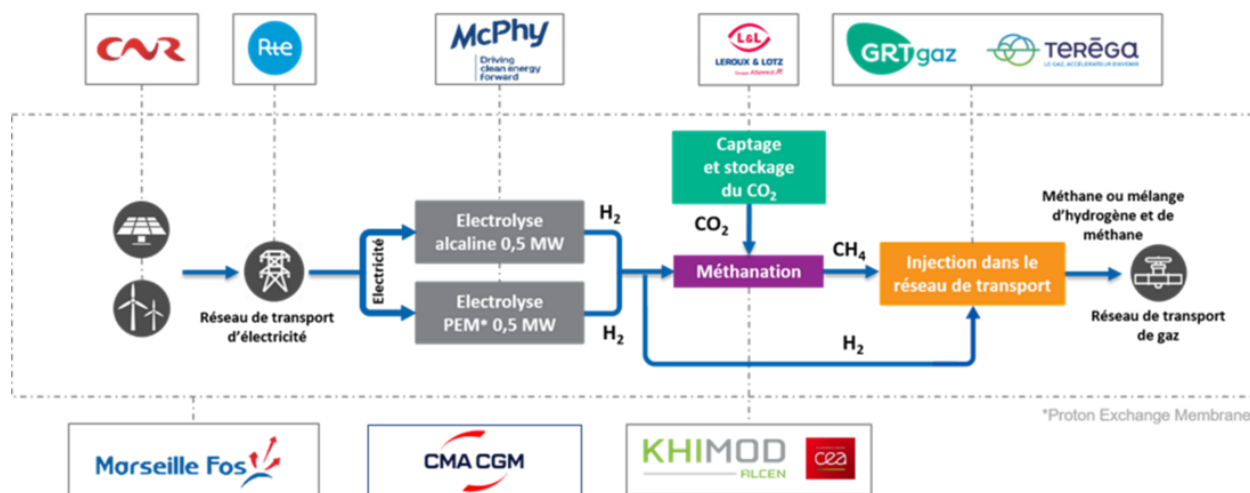


Figure 10 : Schéma du projet de démonstrateur industriel Jupiter 1000 [14]

2.1.2.4. Les enjeux économiques de la filière hydrogène [14]

Les précédentes sections nous ont permis de constater que le développement de l'hydrogène présente des opportunités importantes de décarbonation. Cependant, son implantation n'est pas encore évidente. Une des barrières à son développement reste le surcoût de la molécule bas carbone par rapport à l'hydrogène fossile. Le développement de la filière permettra à terme de réduire le coût de CAPEX des électrolyseurs. Pour initier la démarche, l'état aide au financement des équipements. De cette manière, il a déjà sécurisé une capacité de production électrolytique de 2.5 GW à 3 GW à date [12].

On peut par exemple citer le projet d'électrolyseurs de l'usine de production d'engrais azoté YARA. Cette entreprise, qui figure parmi les 50 sites industriels les plus émetteurs de gaz à effet de serre en France, a fait appel à l'entreprise Lhyfe, pour l'installation d'un électrolyseur d'une capacité de 100 MW. Il fonctionnera principalement avec de l'électricité renouvelable et un complément provenant du parc nucléaire français en cas de besoin. Ce projet est subventionné à hauteur de 149 millions d'euros par l'état, pour un budget global compris entre 200 et 300 millions d'euros. D'une capacité de 100 MW, il permettra de réduire la consommation de gaz naturel du site de 15 %. La mise en service est prévue pour 2028.

Actuellement, le coût de l'hydrogène bas carbone est d'environ 7 euros du kg, soit 210 euros du MWh. Ce qui le rend environ 4 fois plus cher que le gaz naturel (50 €/MWh). Il est également entre 3 et 6 fois plus cher que l'hydrogène fossile. Cependant, les investissements engagés dans la filière et son développement devraient permettre de réduire ces coûts. L'association française pour d'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC) a réalisé une étude du potentiel de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone en France à l'horizon 2030 [11]. Elle donne une estimation de l'évolution du coût de l'hydrogène. Pour ce faire, elle prend pour hypothèses :

- Un prix de l'électricité en légère décroissance
- Un coût du gaz en possible augmentation (taxation carbone)
- Une forte baisse du prix des électrolyseurs grâce à une technologie plus mature et une industrialisation.

La Figure 11 ci-dessous présente une prospective de l'évolution des coûts de production à horizon 2030. Malgré des prix de production de l'hydrogène bas carbone qui chutent à 3.5 euros du kg, ce dernier reste toujours plus élevé que l'hydrogène fossile dont le prix pourrait monter à 2 euros du kg. Ainsi, même après une réduction des coûts, la filière de l'hydrogène bas carbone pourrait continuer de nécessiter des incitations publiques pour être compétitive.

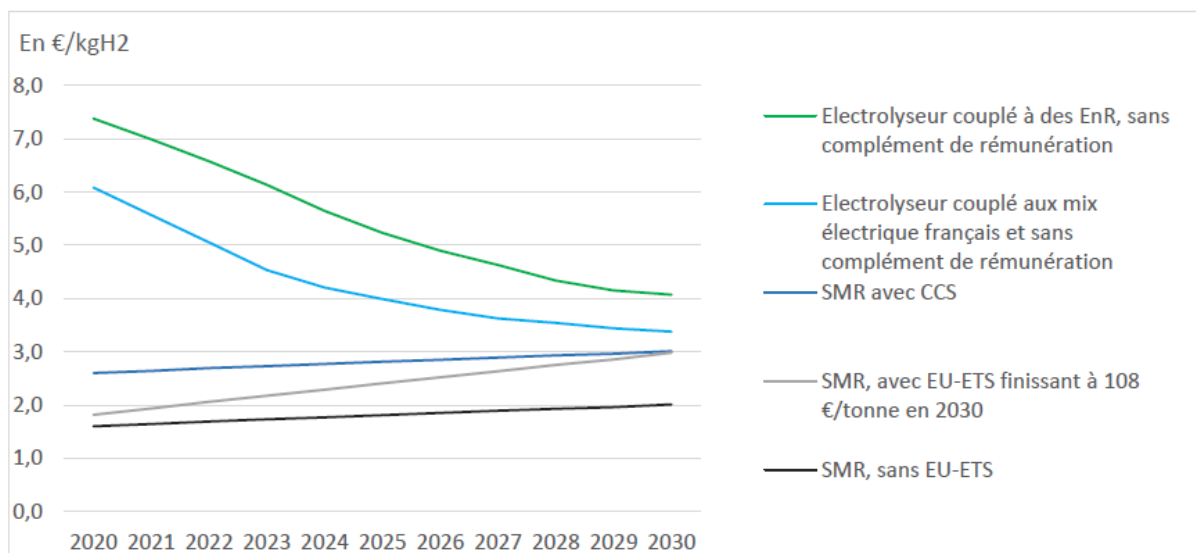


Figure 11 : Évolution des coûts de diverses technologies de production d'hydrogène, tels que pris en compte dans le modèle (en €/kgH2) [11]

2.1.2.5. Les enjeux technologiques de la filière

En plus de la contrainte du prix, l'utilisation de l'hydrogène présente plusieurs contraintes techniques. La première est le développement d'infrastructure pour l'acheminement et le stockage de l'hydrogène. Le transport (hors conduite) de l'hydrogène est un premier défi, il s'agit d'un gaz qui présente une densité très faible (à température et pression normale environ 0,0899 kg/m3).

Afin d'obtenir une densité énergétique intéressante pour le transport, il faut prévoir de le liquéfier. Cela nécessite de descendre et conserver l'hydrogène à la température de -253 °C. Ce procédé, en plus de présenter des contraintes techniques importantes, nécessite une quantité d'énergie élevée qui va dégrader de rendement de production du gaz (de l'ordre de 30 %). Le stockage est un autre enjeu majeur. Actuellement, le stockage en grande quantité n'est pas mature. Le stockage souterrain dans des cavernes ou des aquifères salins est envisagé, mais ces solutions n'en sont encore qu'au stade de projet.

Enfin, les caractéristiques de diffusivité et d'explosivité élevées que présente l'hydrogène imposent des contraintes fortes sur les installations. Les matériaux utilisés devront être compatibles et le risque plus élevé de fuites nécessite d'apporter un soin particulier aux soudures et de prévoir des normes de sécurités plus élevées (ventilation, détection de fuites...).

La substitution des combustibles fossiles par de l'hydrogène dans les procédés thermiques requiert également des adaptations technologiques. Actuellement, la majorité des brûleurs industriels peuvent

admettre une proportion de 20 % d'hydrogène sans impact sur la combustion. Au-delà, il y aura plusieurs phénomènes qui pourront perturber la combustion et nécessiteront une adaptation ou un remplacement :

Une stabilité de flamme plus difficile et des risques de retour de flamme plus importants

Un stress thermique accru sur les matériaux du brûleur. La température de flamme de l'hydrogène est plus élevée que pour le gaz naturel.

Un risque de formation de NOx

Cependant, des brûleurs 100 % hydrogène existent. Il s'agit d'une technologie qui est mature et utilisée depuis longtemps dans certaines industries où l'hydrogène est un co-produit de leur procédé. De plus, le volume des fumées de la combustion d'hydrogène est très proche de celle du gaz naturel. Le débit des fumées de combustion n'est que très faiblement réduit de 3 % à 4 % avec une combustion d'hydrogène. Ainsi une conversion d'une combustion au gaz naturel vers l'hydrogène présente l'avantage de ne pas nécessiter de modification du dimensionnement des installations (conduits de fumée, échangeurs...). En revanche, pour les procédés qui utilisent une combustion directe, il faudra s'assurer qu'une combustion d'hydrogène n'a pas d'impact sur le produit. Les fumées de combustion de l'hydrogène sont plus chargées en vapeur d'eau. Une migration vers une combustion à l'hydrogène devra donc être validée en amont par des essais pour s'assurer que la composition des fumées n'altère pas le produit.

2.1.3. Hybridation et adaptabilité au marché de l'énergie

L'hybridation peut également être perçue comme une opportunité en permettant une flexibilité entre les usages du gaz ou de l'électricité. Cela afin de s'adapter à un marché de l'énergie de plus en plus volatile et offrir ainsi un meilleur contrôle des coûts énergétiques de production. L'hybridation de procédés peut permettre **d'optimiser sa facture énergétique via des arbitrages multiénergies**, à condition d'avoir un contrat de fourniture énergétique adapté. Cette flexibilité permet à la fois d'assurer la continuité des procédés/utilités, et de :

- Saisir les opportunités de marché si le contrat le permet (part SPOT, possibilité de revente d'énergie),
- Participer aux marchés de la flexibilité (effacements, services système, etc.),
- Impacter les coûts de transport d'électricité, et respectivement d'acheminement gaz, en modifiant le profil de consommation.

Les contrats d'électricité peuvent comporter plusieurs des composantes suivantes :

- Part ARENH (fin en 2025) : bandeau d'énergie au tarif réglementé. Le droit à l'ARENH est calculé en fonction du profil de consommation,
- Une part fixe : X% de l'énergie fournie à un prix fixé à l'avance dans le contrat de fourniture. Généralement horo-saisonnalisé (heures creuses été/heures pleines été/heures creuses hiver/heures pleines hiver/tarif « pointe »...),
- Une part exposée au marché SPOT : X% de l'énergie sera facturée au prix du marché au moment où elle est consommée,
- Des engagements de volume d'énergie (pouvant entraîner des pénalités en cas de non-respect),
- Des « Clics » : Possibilité d'achats de blocs d'énergie un nombre donné de fois pendant le contrat. Cela permet de sécuriser un prix pour une part de son approvisionnement en achetant sur les marchés à terme.

Les contrats gaz comportent notamment les composantes suivantes :

- La molécule : son prix peut être fixe, variable ou une composition des deux selon le contrat souscrit et la stratégie de l'industriel. Des engagements de consommation peuvent être appliqués. Tout comme pour l'électricité, il y a possibilité de réaliser des clics. Ainsi son prix sera fonction du volume, de la période de signature, des clics et du profil de consommation notamment.
- Partie acheminement :
 - Distribution : pour les consommateurs de + de 5 GWh/an elle est composée d'un abonnement, d'un prix proportionnel à la consommation et de la souscription d'une capacité journalière d'acheminement
 - Transport : dépend de la capacité journalière
 - Stockage : dépend du profil de consommation et de la modulation du client. (Une consommation principalement hivernale pèsera davantage sur les coûts de stockage qu'un profil estival)

2.2. Les procédés industriels difficilement électrifiables

Les données de l'INSEE présentent en Figure 12 la répartition des consommations d'énergie brute (y compris l'usage des combustibles comme matière première dans les réactions chimiques) par sous-secteur de l'industrie en France pour l'année 2020. On remarque que cinq secteurs représentent plus de 90 % des consommations totales d'énergie de l'industrie. Parmi ces secteurs, on retrouve l'industrie agroalimentaire, la production de papier et impression, la production de matériaux (caoutchouc, plastique et minéraux non métalliques), la chimie et la métallurgie.

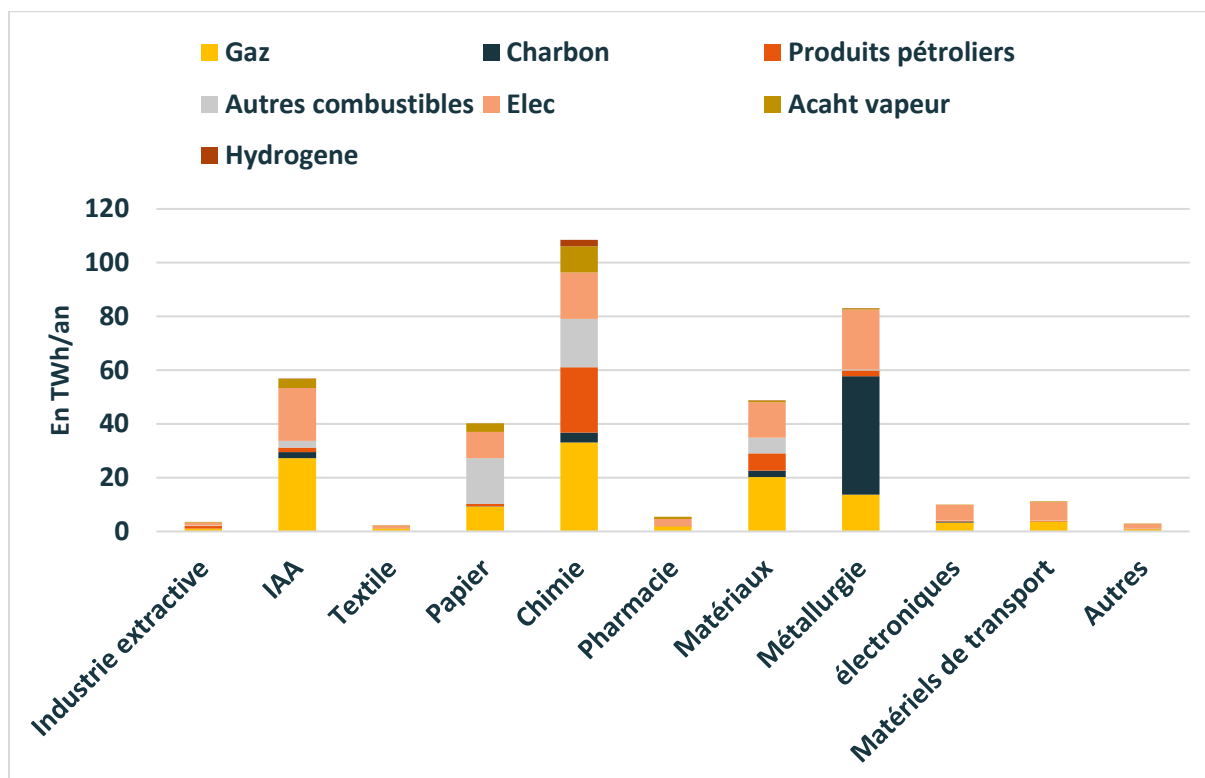


Figure 12 : Répartition de la consommation énergétique brute de l'industrie par sous-secteur et par vecteur énergétique [5]

Parmi les cinq sous-secteurs majoritaires, 2 catégories de consommateurs se distinguent :

- Les process avec un besoin basse température inférieur à 300 °C tels que l'agroalimentaire et le secteur du papier.
- Les process nécessitant de hautes températures au-dessus des 300 °C tels que la chimie, la métallurgie et les matériaux où des fours à très haute température fonctionnent au-delà des 1000 °C.

Dans le cadre de cette étude, les procédés à très haute température sont traités en priorité, car ils sont plus difficiles à décarboner.

Les prochaines sections présentent les trois secteurs des matériaux, de la métallurgie et de la chimie qui mettent en jeu des procédés à haute température.

2.2.1. Secteur des matériaux

2.2.1.1. Les procédés thermiques du secteur des matériaux

Comme présenté en Figure 12 ci-dessus, le secteur des matériaux représente une consommation énergétique de 49 TWh sur l'année 2020 dont 20 TWh de gaz naturel. Cette section s'intéresse en particulier aux matériaux à base de minéraux non métalliques. La production de plastique ou de caoutchouc ne sera pas abordée, car en plus de présenter des procédés majoritairement à basse température, elle consomme principalement de l'électricité.

Le comité stratégique de filière (CSF) industrie pour la construction propose un inventaire des émissions de GES par sous-secteur présenté ci-dessous Figure 13. La suite de ce paragraphe s'attache à présenter brièvement les procédés de fabrication des produits minéraux les plus émetteurs de CO₂.

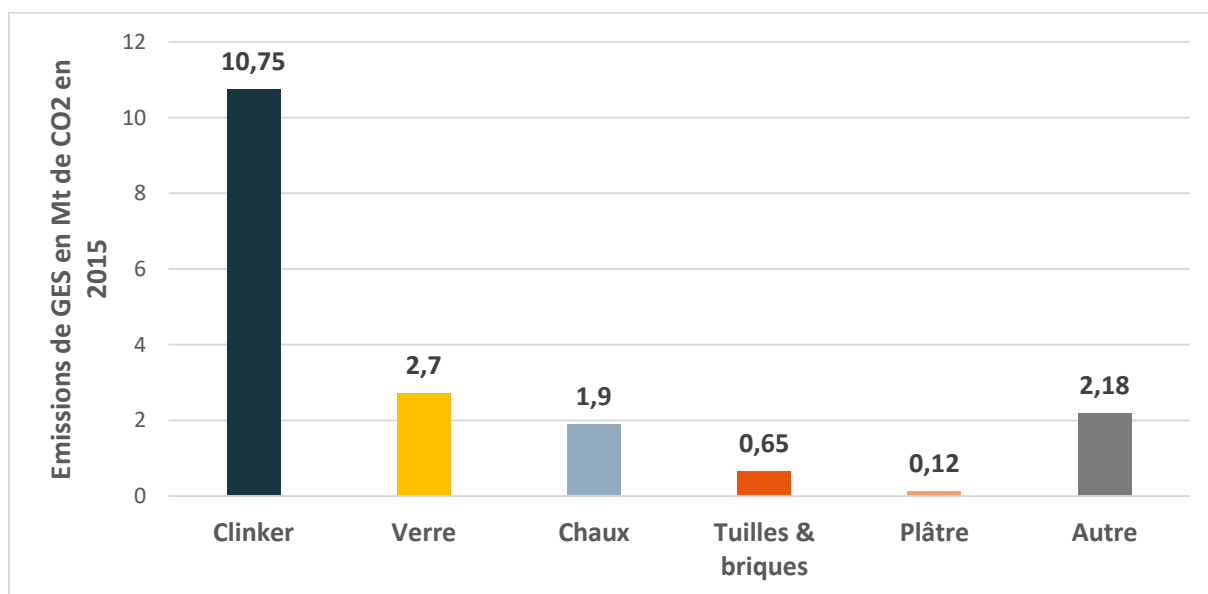


Figure 13 : Inventaire des émissions de GES annuels pour la production de produits minéraux [15]

Fabrication du ciment : Le ciment est un élément central pour le secteur du bâtiment et de la construction, il sert à la production de béton. Le procédé essentiel pour sa production est l'obtention du Clinker. Il est issu d'un mélange de calcaire et d'argile. Le mélange est dans un premier temps concassé et broyé. Il est ensuite préchauffé dans un précalcinateur à 900 °C afin d'extraire l'humidité de la matière. Il passe ensuite dans un four rotatif incliné où la température est élevée à 1 450 °C afin de permettre les réactions chimiques qui aboutiront à la production du Clinker. Le processus est détaillé dans le schéma présenté en Figure 14 ci-dessous.

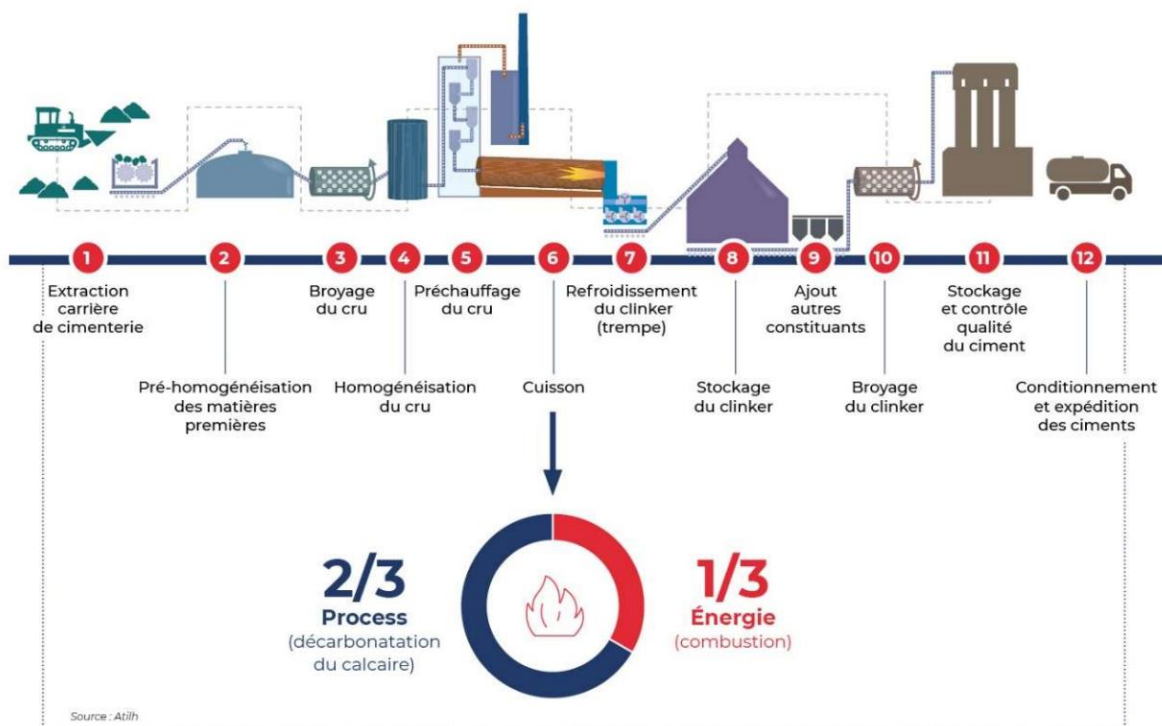


Figure 14 : Schéma du process de fabrication du ciment et répartition des émissions de CO₂ en France [15]

Le sous-secteur de la production de ciment est de loin le plus émetteur en carbone. Il émet plus de 10 millions de tonnes de CO₂ équivalent par an, ce qui représente environ 12 % des émissions de l'industrie française. En revanche, les deux tiers de ces émissions sont produits par le procédé en lui-même qui, par la décarbonation du calcaire, produit du CO₂ ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Concernant le combustible utilisé, les fours rotatifs fonctionnent aujourd'hui principalement au gaz naturel, préféré au charbon et au pétrole plus polluants. Certains fours sont également conçus pour fonctionner avec des déchets solides (pneus usagés, déchets solides, déchets de biomasse, etc.).

Production de verre : Il existe quatre types de verres : les verres plats (vitres pour l'automobile et la construction), les verres creux (bouteille, flaconnage et gobeletterie), la fibre de verre (pour l'isolation ou comme matrice de renfort) et les verres techniques (pour des domaines de l'optique ou la santé).

Ces quatre typologies de production présentent un procédé de fabrication similaire. La première étape de fabrication est la fusion du verre. Elle permet de monter en température les matières premières (mélange de sable, de silice, de soude, de chaux, de calcin dans des proportions variables en fonction du produit final).

La température dans le four de fusion du verre peut atteindre jusqu'à 1 550 °C. La matière y réside plusieurs heures afin d'atteindre la température voulue et d'assurer une homogénéité du mélange. En règle générale, les fours verriers fonctionnent en continu sans arrêt tout au long de la durée de vie de l'équipement (environ une dizaine d'années). Il s'agit de l'étape la plus énergivore du procès. Il existe différentes technologies de fours de fusions, la majorité fonctionne au gaz naturel (four à régénération, four à récupération, oxycombustion...), d'autres technologies proposent des fours tout électriques, pour des niveaux de productions faible, ou hybride avec des boost électriques pour des niveaux de productions plus élevés.

La deuxième étape de production est le transport du verre jusqu'à sa mise en forme. Ce transport est assuré par des canaux de distribution constitués de revêtements en matière réfractaire et réchauffé au gaz pour conserver la fluidité de la matière. L'étape de mise en forme de la matière dépend du type de produit fabriqué (moulage, filière, flottage...). De même suivant le produit, des traitements de surface peuvent être appliqués sur la matière. Une dernière étape sera la recuisson ou le séchage en étuve pour la fibre de verre. Les fours de recuits fonctionnent au gaz ou à l'électricité. Ils appliquent une température de recuisson entre 400 °C et 600 °C et permettent d'éliminer les contraintes internes et d'améliorer les propriétés physiques du verre.

Fabrication de la chaux : La chaux est utilisée pour une large gamme d'usages dont les principaux sont la sidérurgie, la chimie, le papier, le sucre, le traitement des eaux, le bâtiment et la construction. De manière similaire à la production du ciment, la chaux est produite après broyage et concassage du carbonate de calcium puis calcination à environ 950 °C dans un four vertical afin de permettre la décarbonation de la matière première ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). De même que pour le ciment, le procédé de fabrication de la chaux dégage une quantité importante de CO_2 . En revanche, la quantité de chaux produite est de l'ordre de 3 millions de tonnes par an, soit dix fois moins que la quantité de ciment produite.

Fabrication de tuiles et briques : La première étape de fabrication des tuiles et briques est la préparation de la matière première. Elle est ensuite mise en forme par extrusion ou pressage, puis séchée afin d'obtenir une teneur en eau du produit inférieur à 3 % avant la cuisson. Le séchage est réalisé dans des séchoirs tunnel à des températures comprises entre 70 °C et 150 °C jusqu'à atteindre la teneur en eau souhaitée (généralement plusieurs heures).

La cuisson est quant à elle réalisée à une température comprise entre 900 °C et 1 200 °C pour un temps de traitement de plusieurs heures. Elle est réalisée principalement dans des fours tunnel par convection d'air chaud et permet au matériel d'acquies ses propriétés de résistance mécanique, porosité, stabilité... La cuisson et le séchage sont souvent couplés sur les sites de production. Le sécheur est bien souvent alimenté par de la récupération de chaleur sur le four de cuisson. Lui-même est alimenté par des brûleurs gaz qui permettent un brassage de l'air et un transfert par convection.

Production de plâtre : Le plâtre est un élément largement utilisé dans la construction est la rénovation. Il est utilisé sous trois formes : en plaques, en carreaux ou en poudre de plâtre. Il est produit à partir du minerai de gypse extrait des carrières. Après criblage et homogénéisation du gypse, la matière est calcinée dans un four de cuisson qui atteint des températures entre 150 °C et 200 °C. Après l'ajout d'additifs, le plâtre est prêt à l'emploi sous forme de poudre. Le plus souvent, il est mis en forme de plaque ou de carreau de plâtre. La mise en forme du produit nécessite alors un process de séchage pour extraire l'humidité du produit. Il est réalisé dans des séchoirs tunnel en continu, où la température (entre 60 °C et 80 °C) et l'humidité sont contrôlées et pilotées pour garantir la qualité du produit. Les usines de production de plâtres utilisent majoritairement du gaz naturel pour leurs procédés thermiques de cuisson et de séchage.

Autres produits : Il existe d'autres filières de fabrication de produits minéraux tels que la céramique ou les enrobés routiers. On y retrouve le plus souvent les mêmes procédés thermiques qui sont mis en jeu : des fours de fusion, des fours de cuisson et de calcination ou des séchoirs.

2.2.1.2. Exemples de procédé hybridable – les fours verriers

Les fours de fusion du verre sont un bon exemple de procédé difficilement décarbonable étant donné les puissances et températures importantes qu'ils nécessitent. Ils représentent ainsi un enjeu important pour la décarbonation de l'industrie avec des émissions directes de GES qui s'élèvent à 2.7 MtCO₂ en 2019 sur les 81 MtCO₂ de l'industrie en France pour 52 sites de production. De plus, entre 70 % et 75 % des émissions directes du secteur sont liées à la combustion [16].

C'est pourquoi de nombreux efforts sont fournis pour proposer des solutions de décarbonation. Par exemple le projet VERCANE [17] est une étude menée sur 18 mois qui vise à considérer différentes solutions de décarbonation de la filière française de production de verre creux :

- Four de fusion 100 % électrique
- Four de fusion 100 % hydrogène
- Four de fusion 80 % électrique et 20 % hydrogène, biogaz, syngaz ou biométhane.

Pour chaque solution, les contraintes et les limites sont détaillées, puis des critères d'arbitrages ont été proposés afin de donner une orientation à la filière.

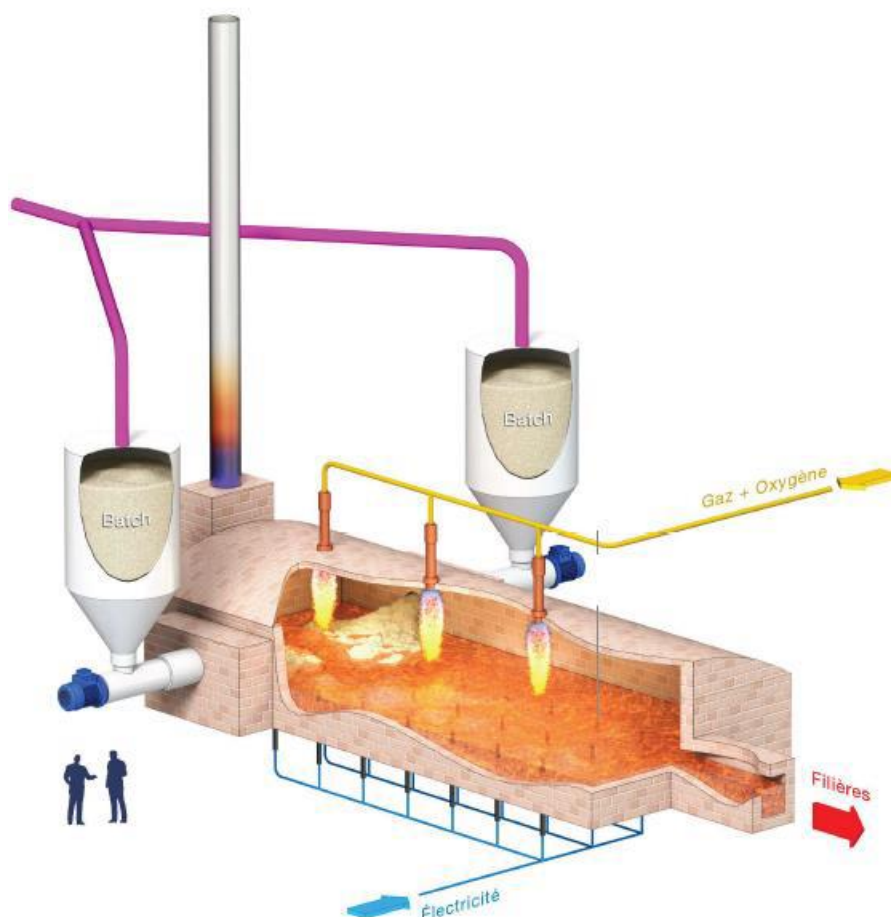


Figure 15 : Schéma d'illustration d'hybridation électrique des fours verriers Owens Corning

Les fours de fusions de verres se prêtent particulièrement bien à une migration rapide de technologie étant donné que ces fours sont reconstruits environ tous les 15 ans. Chaque reconstruction est une opportunité pour adapter ses process vers des usages moins carbonés. Des exemples d'hybridation

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

des procédés sont déjà en application chez les industriels. C'est le cas de l'usine de production de fibre de verre Owens Corning de l'Ardoise dans le Gard. Leurs fours verriers sont équipés d'électrodes au niveau de la sole du four et de brûleurs oxy-gaz en surface comme illustré en Figure 15 ci-dessus. Les électrodes permettent un échauffement de la matière par effet joule. Cette méthode est possible grâce au caractère conducteur du verre à partir de 900 °C qui permet le passage du courant au travers de la matière.

En revanche le taux d'électrification est limité par le niveau de conduction de la matière. Le caractère conducteur du verre est apporté par le taux d'alcalins qu'il contient. Or, pour les verres techniques, les diverses applications imposent un taux en alcalin faible, ce qui limite le niveau d'hybridation. En effet, si une puissance électrique trop élevée est appliquée au niveau des électrodes par rapport au niveau de conductivité de la matière, il y a des risques de courant de fuites au travers de la sole qui auront pour conséquence de détériorer le four et de réduire sa durée de vie.

C'est pourquoi l'industriel Owens Corning explore également d'autres solutions, dont la combustion à l'hydrogène. Ils participent ainsi au projet H2Glass, consortium de différents acteurs du secteur et cofinancé par l'Union européenne. L'objectif est d'accélérer la décarbonisation de l'industrie du verre en développant et en appliquant l'ensemble des technologies nécessaires à la combustion complète de l'hydrogène dans les installations de production de verre. Dans le cadre de ce projet, Owens Corning va prochainement réaliser des tests de combustion à l'hydrogène sur un four afin de tester l'usage de l'hydrogène et l'impact sur leurs produits.

2.2.2. Secteur de la métallurgie

2.2.2.1. Les procédés thermiques du secteur de la métallurgie

Production de fer

Réduction de la matière première : Lors de leur extraction, les minéraux métalliques sont souvent associés à d'autres molécules. Une première étape consiste à séparer les minéraux métalliques afin d'obtenir une composition plus adaptée aux besoins industriels. La méthodologie varie suivant les métaux en jeu. L'acier, qui est le métal le plus utilisé, se trouve généralement sous forme d'oxyde de Fer à l'état naturel. Sa transformation est réalisée dans les hauts fourneaux. Ils permettent la réduction du Fer par la réaction $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$. Le haut fourneau, dont le fonctionnement est schématisé Figure 16, se présente sous la forme d'un four à cylindre de grande hauteur. Il est conçu pour fonctionner en continu. La matière (minerai de fer et coke²) circule à contrecourant des flux d'air. Elle est introduite en haut de four pour être extraite sous forme liquide dans la partie basse du creuset après avoir atteint son point de fusion. L'admission d'air se fait en revanche en partie basse. Elle permet d'établir une atmosphère oxydante et provoque la combustion du coke. Cette combustion générant également de la chaleur permet au minerai de fer d'atteindre son point de fusion. La fonte liquide plus dense s'accumule alors au fond du haut fourneau, surplombé par le laitier qui est constitué des sous-produits de la réaction.

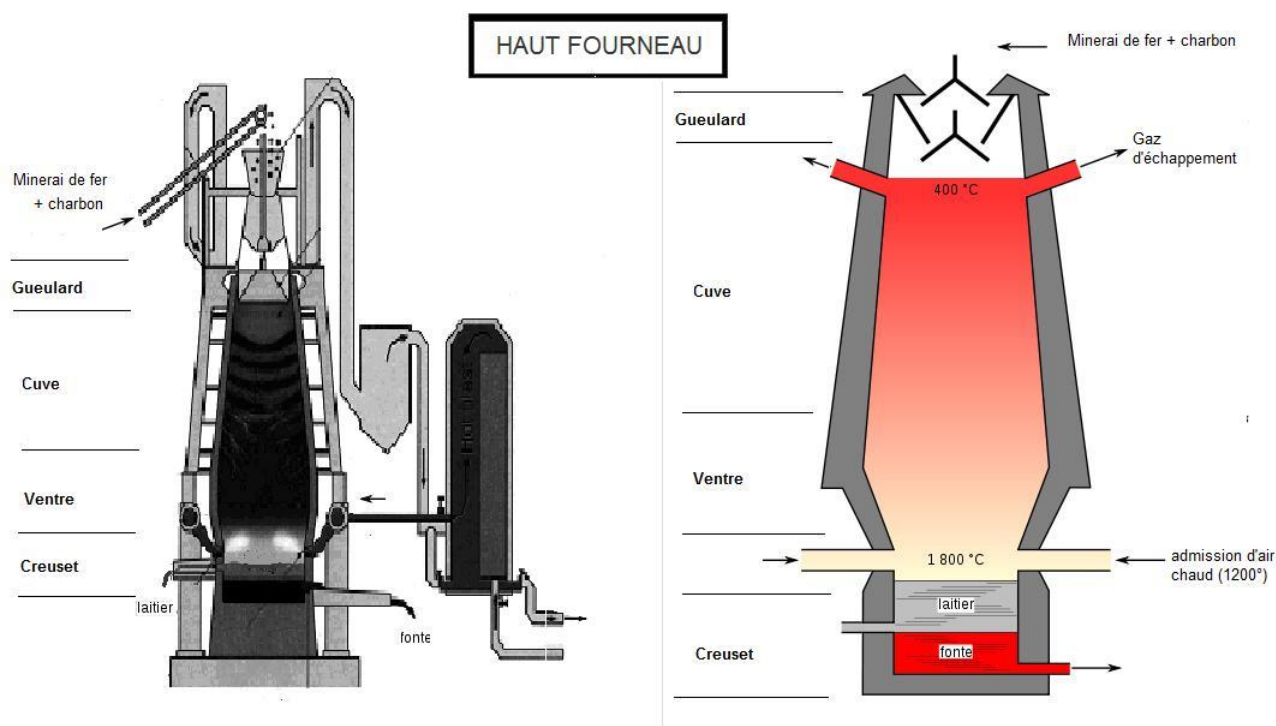


Figure 16 : Schéma de fonctionnement des hauts fourneaux (source Géowiki) [18]

² Le coke est un résidu de carbone quasi pur obtenu par chauffage du charbon par pyrolyse. Ce combustible à fort pouvoir calorifique est principalement utilisé dans les hauts fourneaux où il permet d'atteindre des températures très élevées.

La production d'acier par les hauts fourneaux est une activité très carbonée étant donné son utilisation intensive de coke et la quantité importante de CO₂ généré par la réduction du minerai de fer. Bien que des méthodes de productions alternatives se développent, elles restent encore minoritaires. Principalement à cause de leur investissement initial encore important. Une alternative à la production d'acier est le recyclage de la ferraille. Les déchets sont alors fondus dans un four à arc électrique. Cette voie de production émet environ quatre fois moins de gaz à effet de serre que la méthode standard. Elle est largement développée en Europe où elle représente 40 % de la production.

La fonte ainsi obtenue est ensuite traitée dans un convertisseur à oxygène. Ce dernier permet d'éliminer les impuretés par oxydation via l'insufflation d'oxygène pur sur la matière. En ajustant le taux d'oxygène insufflé ou le temps de traitement et en ajoutant des alliages ou additifs, il est possible de faire varier les propriétés chimiques ou mécaniques de l'acier produit. Une fois le processus de raffinage terminé, l'acier est mis sous forme de brames ou de billettes.

La sidérurgie émet environ 19 millions de tonnes de CO₂ équivalents par an, soit 24 % des émissions nationales industrielles.

Production d'aluminium

Réduction de la matière première : comme pour la production de fer, la production d'aluminium consiste en une étape de séparation du minéral bauxite puis alumine (Al₂O₃) via une opération d'électrolyse en cuve électrolytique alimentée en électricité selon la formule de réduction suivante $2Al_2O_3 + 3C \rightarrow 4Al + 3CO_2$. La production d'aluminium reste une activité très carbonée malgré l'usage de l'énergie électrique pour alimenter la réaction d'électrolyse liée à la quantité importante de CO₂ généré par la réduction du minerai d'alumine.

La production l'élaboration et le travail de l'aluminium représente le deuxième poste le plus énergivore et émetteur en CO₂. La production d'aluminium est autosuffisante sur le territoire et est réalisée en totalité sur deux sites industriels.

Production d'autres métaux et métaux rares (cuivre, laiton, zinc, nickel, chrome, etc.)

La production des autres métaux malgré leur diversité reste relativement marginale en termes de consommation énergétique, car peu d'unités de fabrication sont présentes en France (production de Nickel en outre-mer), les métaux déjà transformés étant pour la plupart importés sur le territoire.

Travail des métaux

Mise en forme à chaud : Il existe deux méthodes pour la mise en forme des métaux, le procédé de forge ou le procédé de fonderie. Chacun répond à un besoin différent.

La mise en forme par **forge** consiste à travailler le métal par déformation. La déformation est réalisée à l'aide d'un procédé d'extrusion, d'une presse ou par l'application de chocs. Pour permettre la déformation du métal, il est dans un premier temps réchauffé dans un four de réchauffage avant forge. La température de préchauffage dépend des alliages traités et varie entre 350 °C et 1 300 °C. Les fours de réchauffage fonctionnent au gaz naturel ou à l'électricité.

Dans le cas de la **fonderie**, la mise en forme se fait par coulée du métal liquide dans un moule. Cette méthode s'applique pour la production de pièces dont la forme est plus complexe ou le volume est important. La matière première est fondue dans un four dont la température dépend du métal à mettre en forme. Par exemple 680 °C pour de l'aluminium ou 1 750 °C pour de l'acier. Il existe une multitude de fours dont les caractéristiques et le fonctionnement diffèrent suivant le type et la quantité de métal à traiter. Les fours de fonderies utilisent de multiples sources d'énergie.

Le charbon est utilisé pour les applications haute température. On retrouve également de nombreux fours de fusion qui utilisent du gaz naturel. Enfin, certains fours de fonderies sont électriques et fonctionnent par induction ou arc électrique.

Bien que les fours électriques présentent l'intérêt d'émettre moins de carbone, leur utilisation reste encore limitée. En effet, ils présentent plusieurs contraintes qui freinent leur développement :

- Un coût d'investissement plus important qu'un four traditionnel
- Un coût de l'énergie électricité élevé
- Des limites en termes de puissance (pas adapté pour les grosses productions)
- Une maintenance plus importante
- Un temps de fusion plus élevé

En revanche, le four fusion électrique présente des avantages tels qu'une meilleure flexibilité et précision qui les rend intéressants pour des applications spécifiques à forte valeur ajoutée.

Traitement thermique : Une fois la pièce mise en forme, elle passera systématiquement par un traitement thermique qui a pour but de lui transmettre les propriétés souhaitées. Le traitement thermique consiste à faire subir différents niveaux de contraintes thermiques à un alliage métallique afin de transformer sa structure dans la masse. Le plus souvent le cycle appliqué comprend un procédé de trempe suivi d'un procédé de revenu. Il peut être réalisé en atmosphère contrôlée afin d'éviter tout risque de réaction d'oxydation ou de décarburation.

La trempe consiste à maintenir à une température spécifique (comprise entre 400 °C et 1 200 °C en fonction des alliages) le matériau sur une durée déterminée pour permettre une transformation microstructurale. Elle se termine par un refroidissement rapide et contrôlé en plongeant le métal dans un liquide de trempe (eau, huile...).

Un revenu est réalisé afin de restaurer une certaine ductilité et résistance à la matière qui est rendue dure et fragile en sortie de trempe. Il consiste à chauffer puis maintenir à température la matière sur une période donnée. Le niveau de température sera ici plus faible que pour une trempe (en général entre 150 °C et 650 °C en fonction des alliages). Le refroidissement est lent et contrôlé afin d'éviter les chocs thermiques.

Traitement de surface : Il s'agit de la dernière étape de la production de pièces métallique. Elle n'est pas systématique, certains produits sont déjà finalisés après leur traitement thermique. L'objectif de cette dernière étape de fabrication est d'améliorer l'aspect visuel, la résistance à la corrosion, aux agents chimiques et de manière générale permettre un meilleur vieillissement de la matière. Il existe deux familles de procédés de traitements de surface qui sont l'application d'un revêtement ou la conversion électrochimique.

L'application d'un **revêtement** comprend par exemple les procédés de galvanisation à chaud, application d'émaillage, de peinture ou vernis. Ces procédés nécessitent souvent un apport de chaleur apporté par du gaz naturel ou de l'électricité. On peut citer quelque exemple :

- Four de galvanisation qui permet de maintenir le zinc en fusion à 450 °C.
- Les fours tunnel de séchage par convection pour l'application de l'émail
- Les fours de cuisson de peinture et de vernis. Souvent réalisé avec des chauffages radiants couplés avec un système de chauffage par convection

Le traitement par **conversion électrochimique** consiste à faire réagir superficiellement la surface de la pièce. Cette dernière est plongée dans une solution de conversion ou va se produire une réaction électrochimique qui va former une couche de conversion sur la surface métallique (zinc, cuivre, nickel, cuivre...). Ce procédé est peu énergivore, car il se passe à basse température. La température des bains d'électrolyse ne dépassant pas les 100 °C.

2.2.2.2. Exemples de procédé hybridable – les hauts fourneaux

La sidérurgie est le secteur le plus émetteur en France, il représente 22 % des émissions de GES de l'industrie et 4 % des émissions de GES global en France. Le schéma Figure 17 ci-dessous présente la répartition des émissions de GES. Les hauts fourneaux sont responsables de 85 % des émissions du secteur. Bien que la mise en place d'actions d'efficacité énergétique ait déjà été poussée pour réduire l'impact de l'activité, les émissions générées par le procédé de réduction des minéraux d'oxyde de fer par le carbone ne peuvent être réduits sans un changement de procédé de fabrication. La fabrication d'une tonne de fonte par la filière des hauts fourneaux émet environ 2 tonnes de CO₂ équivalents [19].

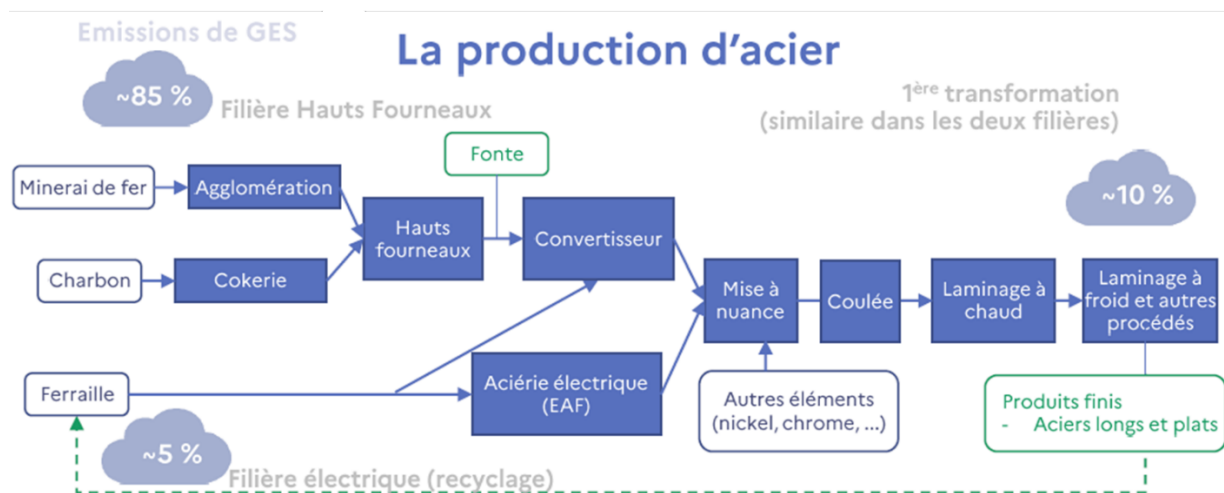


Figure 17 : Les enjeux de décarbonation de la filière de production d'acier [19]

D'autres solutions de production de l'acier commencent à être développées, mais la migration des installations de haut fourneau existante vers des technologies moins carbonées est un objectif ambitieux qui nécessitera un temps de mise en place important du fait des investissements qu'il nécessite. D'autant plus que le secteur de la sidérurgie est très concurrentiel ou les marges sont faibles et laissent peu de place pour des investissements d'envergure.

Parmi les trois hauts fourneaux présents sur le territoire Français, le site de Dunkerque présente un projet de production d'acier à basses émissions prometteur. Il prévoit une modification en profondeur

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

du site avec à terme le remplacement de deux hauts fourneaux (sur les 3 initialement en place) par une unité de réduction directe (DRI) et deux fours à arc électrique.

Le site de Dunkerque est un emplacement stratégique pour le projet, car il se situe à la fois à proximité du grand port industriel et dans une zone industrielle particulièrement dynamique où des projets de mise en place de hub hydrogène sont en cours. Ces caractéristiques rendent le site particulièrement propice à la mise en place d'une unité de réduction directe.

En effet le procédé de réduction directe permet de produire du fer métallique à partir du minerai de fer, sans passer par l'étape de fusion dans un haut fourneau. Le procédé repose sur la réduction du minerai de fer par un agent réducteur à des températures plus faibles (entre 800 °C et 1200 °C). L'agent réducteur peut être du charbon, du gaz naturel ou de l'hydrogène comme présenté dans la Figure 18.

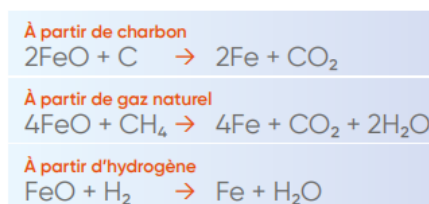


Figure 18 : Les différentes réactions de réduction de l'oxyde de Fer [20]

L'objectif est de remplacer le coke actuellement utilisé dans les hauts fourneaux par de l'hydrogène dans une unité de réduction directe. Durant la période de transition et avant que l'hydrogène bas carbone soit disponible dans des quantités suffisantes, le gaz naturel pourra être utilisé en phase de transition. Ce transfert de procédé de fabrication permettra de réduire de 1,8 à 0,5 tonne les émissions de CO₂ pour une tonne d'acier produit. Les chiffres clefs du projet sont présentés en Figure 19.

	Montant de l'investissement : 1,4 milliard d'euros
	Capacité de production aujourd'hui et demain : 6,8 millions de tonnes d'acier par an (soit environ 40% de l'acier produit en France)
	Réduction des émissions CO ₂ : -36% pour ArcelorMittal France
	Procédé actuel de fabrication d'1 tonne d'acier produite = 1,8 tonne de CO₂ émise aujourd'hui
	Procédé futur de fabrication = 0,5 tonne de CO₂ émise en 2027
	Mise en service du projet = 2026
	Site ArcelorMittal Dunkerque = 3 200 emplois

Figure 19 : Les chiffres clefs du projet de production d'acier à basse émission de Dunkerque [20]

2.2.3. Secteur de la chimie

2.2.3.1. Description de la situation du secteur Chimie

Avec près de 4 000 entreprises, 129 milliards d'euros de chiffres d'affaires et 225 000 salariés, l'industrie de la Chimie est le premier secteur manufacturier exportateur de France. Il participe à la croissance économique française avec, depuis 1990, une progression de sa valeur ajoutée de +2,1 %/an, contre +0,6 %/an pour l'ensemble industrie manufacturière.

L'industrie de la Chimie fait appel à des savoir-faire variés, de l'amont à l'aval, de la production des produits chimiques de base aux intermédiaires à la formulation, en passant par les spécialités chimiques.

La chimie minérale

Elle utilise surtout les matières premières comme l'eau, l'air, le gaz, et des minéraux tels que le sel, le soufre, le calcaire, le sable et les phosphates.

Applications : fabrication des colorants et des pigments, des gaz industriels, ainsi que des produits chimiques inorganiques de base comme le chlore, la soude et les engrais.

La chimie organique

C'est la chimie des composés du carbone. Liée au pétrole, elle regroupe la fabrication de produits pétrochimiques (propylène, benzène, etc.), de matières plastiques (PVC, etc.) et de caoutchouc synthétique (élastomères).

Applications : fabrication de pièces pour l'aéronautique, l'automobile, mais aussi la production d'emballages.

La chimie fine

À partir des intermédiaires de la chimie organique ou d'origine végétale, le secteur de la chimie fine élabore des molécules complexes (les principes actifs) issues de nombreuses réactions chimiques en série formulées ensuite en produits spécifiques.

Applications : produits pharmaceutiques de base, utilisés ensuite par les laboratoires pour fabriquer des médicaments.

La chimie de spécialité

Les spécialités chimiques rassemblent des produits dont les propriétés sont définies pour un usage spécifique (traitement de l'eau, huiles essentielles, matières plastiques de base, produits phytopharmaceutiques...).

Applications : savons et détergents, produits de beauté, peintures et encres, mais aussi colles et adhésifs, produits de protection des plantes, etc.

Les savons, parfums et produits d'entretien

Ce secteur s'appuie sur la formulation (le mélange) et le conditionnement des produits issus des chimies minérale, organique et de spécialités.

Applications : savons, produits détergents, parfums et produits de toilette à destination du grand public.

D'un point de vue procédés, le secteur de la chimie comprend une grande diversité de process thermique de transformation lié à la très grande diversité de produits élaborés. Une large gamme de procédés existe, depuis les grosses installations fonctionnant à haute température (vapocraquage) jusqu'aux procédés discontinus fonctionnant à basse température.

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux procédés thermiques du secteur de la chimie pris au sens large.

Procédé thermique	Description	Principe	Exemples de produits élaborés	Énergie thermique utilisée	Domaine de la chimie	Plages de températures (°C)
Fours de calcination	Chauffage à haute température	Réduction thermique ou réaction chimique	Chaux, alumine, magnésium	Gaz, fioul, charbon, électricité	Minérale	800 - 1500
Réacteur chimique	Réaction exothermique	Dégagement chaleur	Ammoniac, acide sulfurique, acide nitrique	Refroidissement	Minérale Organique	< 500
Réacteur chimique	Réaction endothermique	Apport de chaleur nécessaire	Chlorate de potassium, nitrate d'ammonium, acide chlorhydrique, acide phosphorique	Vapeur, eau chaude, fluide thermique	Minérale Organique	< 300
Four de fusion	Liquéfaction de produit	Enceinte chauffée	Polymères thermoplastiques	Gaz, électricité	Minérale Organique	100 - 300
Four de frittage	Mise en forme de poudres par chauffage	Enceinte chauffée	Aimants, piles à combustible, catalyseurs	Gaz, électricité	Minérale Spécialités	500 - 1500
Four pyrolyse	Chauffage à haute température	Réduction thermique en absence d'O ₂	Ethylène, acétylène	Gaz, fioul, charbon, électricité	Organique	400 - 1000
Cristalliseur	Opération de cristallisation	Enceinte refroidie	Acides citrique acétique Produits pharma	Refroidissement	Organique Chimie fine	< 200
Colonne de distillation	Séparation de liquides	Evaporation/Condensation	Essences, alcools, huiles essentielles, solvants, carburants	Vapeur fluide thermique	Organique Spécialités	50 - 300
Extrusion	Opération de façonnage à chaud	Forçage en pression dans une filière	Polymères (plastiques)	Electricité	Organique Spécialités	50 - 300
Injection	Opération de façonnage à chaud	Moulage à chaud	Polymères (plastiques)	Electricité	Organique Spécialités	50 - 300

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE.
Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Sécheurs	Séchage de produits	Enceinte chauffée	Peintures, encres, adhésifs, etc.	Combustibles, air chaud, vapeur, infrarouge	Organique Spécialités Produits d'entretien	50 - 200
Four de vapocraquage	Décomposition de molécule organique	Enceinte chauffée	Ethylène, propylène, hydrocarbures	Combustible Electricité Vapeur	Organique	100 - 1000

Tableau 2 : Principaux procédés de l'industrie chimique

2.2.3.2. Consommations d'énergie et émissions de CO2

La Chimie est un grand consommateur de ressources, à la fois comme sources d'énergie et comme matières premières. Elle consomme ainsi environ 33 % du gaz naturel (près de 50 TWh/an) et 20 % de l'électricité (près de 23 TWh/an) utilisés dans l'industrie en France (cf. Figure 20 pour le détail des consommations).

Selon le CITEPA, les émissions de la Chimie s'élevaient, en 2021, à 18,7 MtéqCO2.

- Un tiers d'entre elles sont issues des procédés, en particulier dans les unités de vaporeformage produisant l'hydrogène pour la synthèse de l'ammoniac.
- 60 % d'entre elles sont concentrées sur un nombre limité d'installations :
 - 6 vapocraqueurs : 35 % des émissions ;
 - 4 sites producteurs d'ammoniac : 12 % des émissions ;
 - 2 soudières productrices de carbonates : 7 % des émissions ;
 - 4 grands sites producteurs de polymères de spécialité : 6 % des émissions.

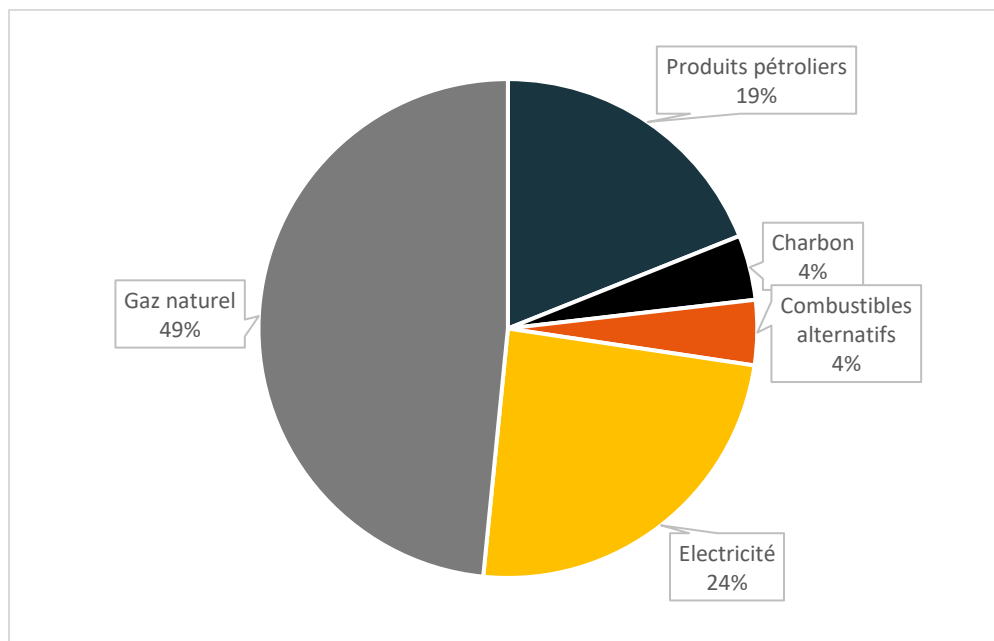


Figure 20 : Consommations d'énergie de la Chimie en 2021, hors matière première des vapocraqueurs (TWh)

La Figure 21 détaille la répartition des émissions de CO₂ par filière de production de la chimie.

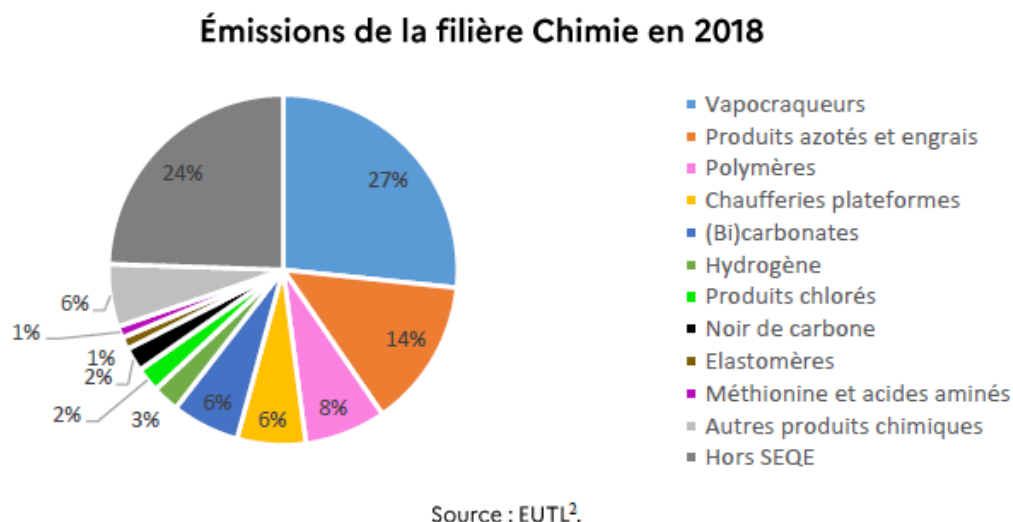


Figure 21 : Répartition des émissions de CO₂ par filière de production de la chimie

L'industrie de la chimie en France a réduit ses émissions de gaz à effet de serre de 65 %, entre 1990 et 2021, grâce à une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique de sa production d'énergie et de ses procédés, et à une diminution drastique des émissions de protoxyde d'azote (N₂O), liées à la production d'acides adipique et nitrique.

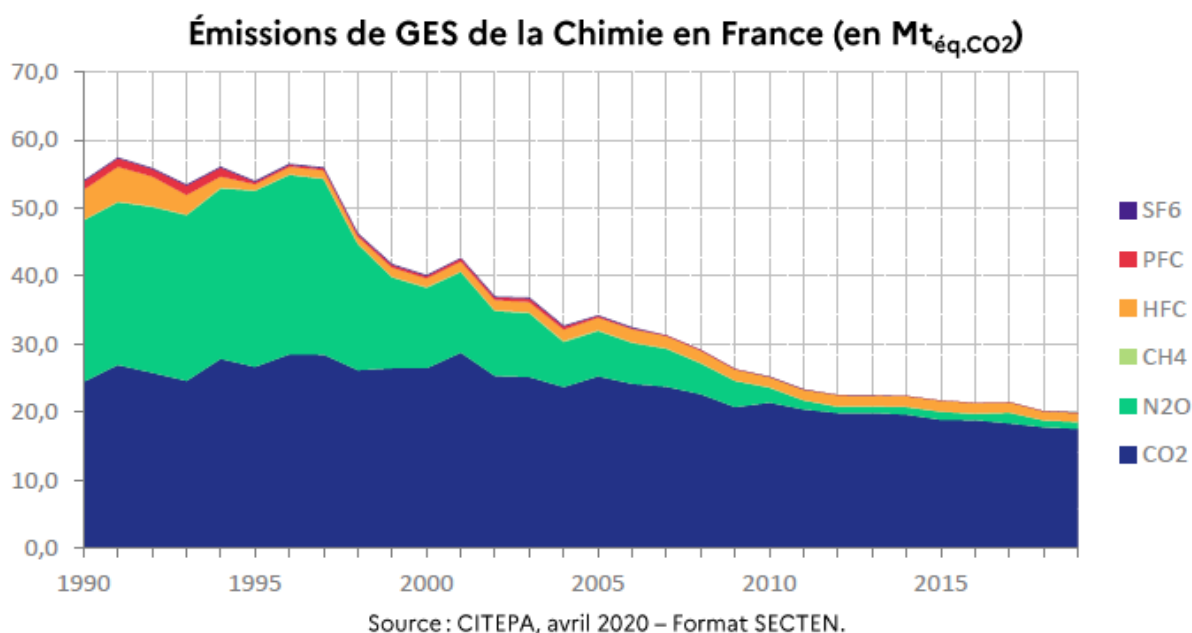


Figure 22 : Evolution des émissions de CO₂ de la chimie depuis 1990

2.2.3.3. Les leviers de décarbonation disponibles

L'efficacité énergétique

Le potentiel d'économies d'énergie a déjà été largement exploité, ce qui laisse un gisement faible mais encore exploitable, notamment en matière de valorisation de la chaleur fatale industrielle.

La chaleur bas carbone issue de la biomasse et des déchets non recyclables

Les combustibles solides de récupération (CSR) et la biomasse apparaissent comme les principales sources d'énergie bas carbone pour se substituer aux combustibles fossiles. Ces énergies sont pertinentes pour des raisons de volumes disponibles et de coûts.

La capture et stockage de CO₂

La capture et le stockage de CO₂ est une solution envisageable même si des technologies sont encore en développement. Cette solution reste intéressante en particulier pour les grands sites en bord de mer qui peuvent bénéficier du projet Northern Light.

Émissions de CO₂ difficilement abattables

Certains procédés et certaines installations dans la Chimie en France peuvent difficilement se passer du gaz naturel comme combustible, en particulier :

- Cogénérations ;
- Torches de sécurité, en particulier sur les vapocraqueurs ;
- Incinération de solvants ou de déchets dangereux sur les sites industriels ;
- Traitement thermique du protoxyde d'azote ou de composés organiques volatils.

S'il est techniquement possible de substituer ce gaz naturel par des gaz décarbonés (H₂, biométhane, etc.), les coûts et les volumes associés rendent cette solution difficilement accessible à court et moyen terme.

L'hybridation

Par l'électrification des procédés

Plusieurs technologies fonctionnant à l'électricité peuvent dans certaines conditions se substituer à la combustion d'énergies fossiles : les pompes à chaleur, la compression mécanique de vapeur, les chaudières électriques.

Par l'emploi de l'hydrogène bas carbone produit par électrolyse de l'eau

La chimie produit et consomme environ 300 000 tonnes d'hydrogène par an, dont environ 250 000 tonnes sont produites par vaporeformage de méthane qui reste économiquement compétitif malgré les 8 à 10 tonnes de CO₂ par tonne d'hydrogène produite (2,5 Mt/an).

La décarbonation de cette production d'hydrogène constitue donc un axe important de la transition énergétique de la filière que ce soit par électrolyse ou par stockage du CO₂ (le captage existe déjà dans le procédé).

Restent les autres utilisations thermiques qui peuvent être assurées par l'hydrogène dans des fours ou des chaudières.

2.2.3.4. Des exemples de projet mis en place par le secteur chimie

La carte du territoire recense les principaux projets d'investissement destinés à décarboner le secteur.

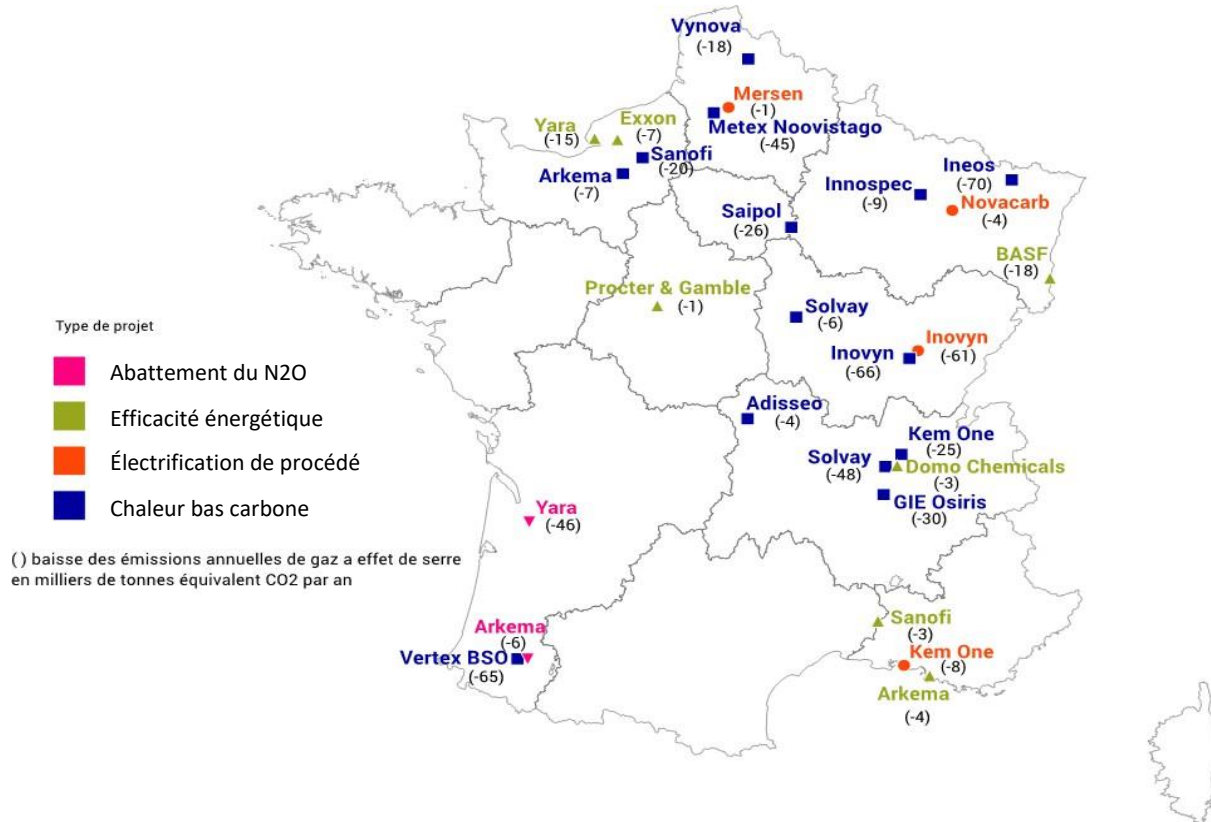


Figure 23 : Cartographie des projets de l'industrie chimique soutenus par France Relance (2023)

Au travers des projets soutenus par le plan de relance, il est possible d'identifier la dynamique du secteur chimie pour décarboner ses sites. La mise en œuvre de ces projets va conduire à une réduction d'émissions de gaz à effet de serre de plus de 0,6 Mt CO₂/an.

La plupart de ces projets concernent l'utilisation de chaleur carbone (bois ou combustible solide de récupération) en lieu et place des combustibles fossiles usuellement utilisés. Au-delà des références présentées sur cette carte, il est important de citer la réalisation effectuée par la Société Roquette en Alsace (usine d'amidon) : l'usine fonctionne avec une chaudière bois de 43 MW et une ressource géothermique haute température de 22 MW. Cette dernière technologie est malheureusement difficilement extrapolable au niveau français dans la mesure où n'existent que peu de ressources géothermales haute température. Par contre, un couplage géothermie basse température - pompe à chaleur aurait de la pertinence pour certains secteurs industriels.

Pour les autres projets cités dans la figure, il est intéressant d'en déterminer la nature :

Efficacité énergétique :

- Exxon : amélioration de l'intégration thermique entre les unités d'alkylation et de craquage catalytique
- BASF : nouveau procédé de production de l'hexaméthylène diamine (matière première du nylon)
- Domo Chemicals : installation d'un présalicateur

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- Procter & Gamble : récupération de chaleur sur groupe froid et mise en place d'une pompe à chaleur
- Sanofi : récupération de chaleur sur incinérateur et mise en place d'une pompe à chaleur à absorption
- Arkema : revamping chaudière

Électrification

- Mersen : mise en place d'un four à induction
- Innovyn : recompression mécanique de vapeur sur un concentrateur
- Kem One : remplacement groupe froid

Hydrogène

- Yara : mise en place d'un électrolyseur 100 MW électrique pour abattre 15 % des émissions de CO2 par utilisation de combustible hydrogène

3. Études de cas d'hybridation

Dans cette section, nous explorons trois études de cas illustrant des solutions d'hybridation pour des procédés difficiles à électrifier. Chaque étude de cas met en lumière les défis et les limites de l'hybridation et permet d'identifier les efforts nécessaires à la décarbonation. Les cas étudiés ont été choisis dans le but de couvrir plusieurs secteurs d'activités ainsi que des technologies variées.

3.1. Définition des études de cas

3.1.1. Périmètre

Le périmètre de ces études de cas englobe tous les procédés thermiques difficilement électrifiables, soit principalement les procédés à haute température. Les solutions étudiées prendront en compte uniquement les hybridations du gaz naturel avec de l'hydrogène ou du gaz naturel avec de l'électricité comme défini en Figure 3.

Il est important de noter que seules les émissions de CO₂ liées aux consommations d'énergies du procédé thermique sont considérées. Les émissions annexes (matière utilisée, cycle de vie du produit, émissions liées aux procédés chimiques) ne font pas partie du périmètre.

Pour chacun des cas proposés, une analyse des gains potentiels résultants de solutions d'hybridation sera réalisée à travers une analyse technico-économique. Ces analyses porteront sur le bénéfice immédiat et à court terme sans inclure de projection sur plusieurs années. L'objectif principal est d'évaluer l'impact direct de l'hybridation sur les procédés industriels concernés, en mettant en lumière les aspects techniques et économiques.

3.1.2. Sélection des cas

La section précédente a permis de démontrer que les trois secteurs de la chimie, la métallurgie et des matériaux non métalliques sont parmi ceux qui présentent le plus de procédés thermiques difficiles à électrifier. Chacun de ces secteurs sera donc utilisé comme exemple pour l'élaboration des études de cas.

De plus, les fours et les sécheurs représentent plus de 80% de la consommation totale d'énergie thermique non électrique des procédés (hors production d'utilités chaudes pour l'industrie) [3]. Ces deux procédés thermiques seront donc nécessairement détaillés lors des études de cas.

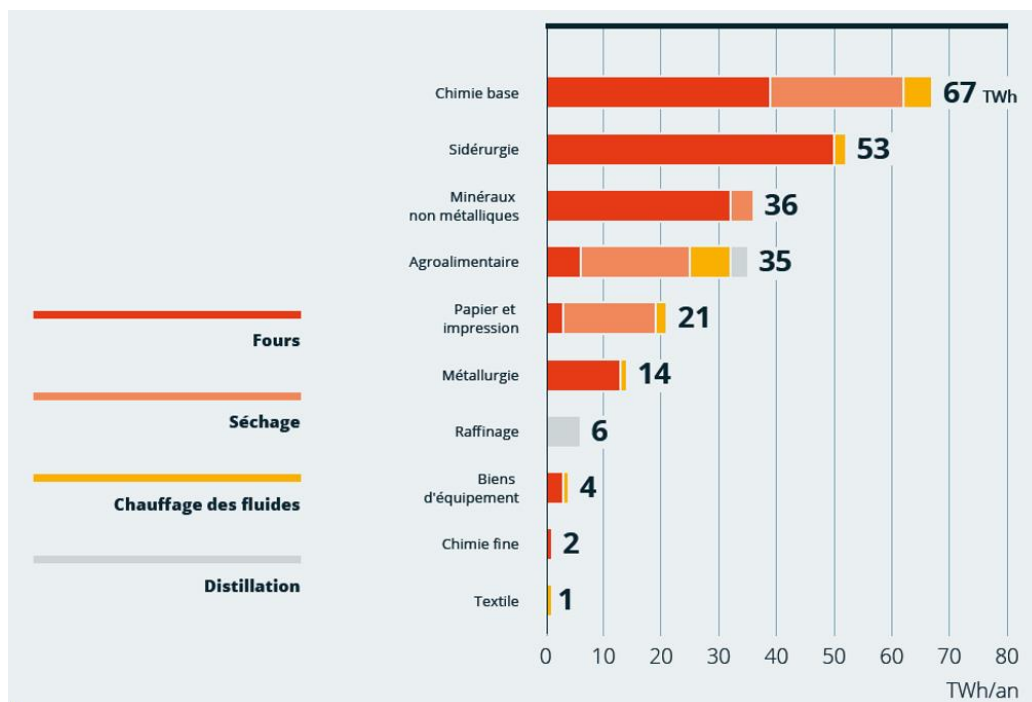


Figure 24 : Répartition des 240 TWh de consommation énergétique annuelle des usages thermiques non électriques, par procédés et par secteur (2014) [3]

Les études de cas s'attacheront également à aborder les deux solutions d'hybridation du périmètre de cette étude qui sont les vecteurs de l'électricité et de l'hydrogène.

Métallurgie :

Comme souligné dans le paragraphe 2.2.2, le secteur de la métallurgie dépend largement de l'utilisation de fours pour des procédés de fusion, de mise en forme ou de traitement thermique. Selon la Figure 24, ces fours représentent environ 90% des usages thermiques non électrique du secteur. En tenant compte de cette information, l'étude de cas menée dans le secteur de la métallurgie se concentrera sur l'analyse d'un four de fusion.

Matériaux :

Le secteur des matériaux comprend de nombreux procédés de fabrication dont les principaux sont résumés au paragraphe 2.2.1. Comme présenté en Figure 24, plus de 90% des usages thermiques du secteur sont dédiés aux fours pour les procédés de calcination, ou de traitement thermique. Ce constat justifie le choix du four de cuisson comme objet d'étude dans le secteur des matériaux non métalliques.

La chimie :

Le secteur de la chimie est le plus consommateur d'énergie de l'industrie. Il se répartit en de nombreux sous-secteurs (chimie minérale, organique, fine, diverse...) et regroupe une grande diversité de produits. Les procédés thermiques qu'il met en jeu sont très divers. Certains rentrent dans la catégorie des procédés difficilement électrifiable du fait des puissances et températures élevées nécessaires. La Figure 24 montre que le séchage représente 30% des usages thermiques non électrique de la chimie. Parmi les trois secteurs détaillés dans cette étude, celui de la chimie présente la plus grande part de consommation dédiée au séchage et sera donc développé dans l'étude de cas chimie.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

3.1.3. Méthodologie

La méthodologie employée comporte trois phases :

- 1) Définition du cas de référence
- 2) Définition du scénario d'hybridation
- 3) Analyse comparative

Le schéma ci-après résume cette méthodologie.

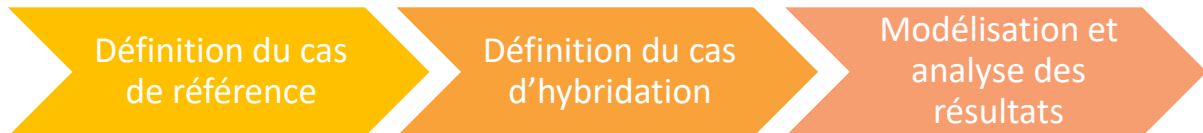


Figure 25 : Schéma de la méthodologie des études de cas

Définition du cas de référence :

La définition du cas de référence est nécessaire pour définir les besoins du procédé considéré. Ce cas de référence comprend plusieurs éléments clés. Tout d'abord, il décrit le type de produit traité et la nature de la transformation étudiée (séchage, traitement thermique...), puis il identifie les contraintes liées au produit, tel que les exigences de température ou de durée du process. Le cas de référence identifie également la technologie utilisée pour répondre au besoin produit. Cela comprend le procédé thermique mis en jeu, l'équipement utilisé (séchoir, four...), le type de combustibles utilisé, le niveau de puissance de l'équipement ainsi que son rendement énergétique.

Ainsi, la définition du cas de référence combine à la fois les exigences du processus et les caractéristiques techniques de la technologie utilisée, fournissant ainsi une base claire pour l'évaluation, l'optimisation et l'amélioration des performances énergétiques et environnementales du procédé thermique étudié.

Définition du cas d'hybridation :

En repartant des situations de références, il est établi un scénario d'hybridation. Comme dit précédemment, l'idée n'est pas d'identifier un scénario idéal, optimisé au maximum, mais de fournir des options réalistes par rapport aux technologies actuelles (et à venir prochainement).

La définition du cas d'hybridation propose une modification du vecteur énergétique utilisé dans le processus de production sans altérer le procédé thermique ni le traitement du produit final. Il propose une conversion d'une configuration utilisant exclusivement du gaz naturel à une configuration hybridée où le gaz naturel est combiné avec de l'électricité ou de l'hydrogène. Cette adaptation se fait sans nécessiter le remplacement complet de l'unité de production, mais plutôt par une intégration efficace de nouveaux équipements et technologies. L'objectif principal est de réduire l'impact carbone, en exploitant de nouvelles sources d'énergie, tout en maintenant la continuité des opérations et en minimisant les modifications structurelles et les coûts associés.

Modélisation et analyse des résultats :

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Les analyses économiques, énergétiques et environnementales des cas sont réalisées par le CETIAT, sous un modèle Excel. Cette modélisation se base sur une approche simplifiée des différentes parties du procédé thermique qui possèdent chacun des paramètres d'entrée/sortie. La modélisation du comportement thermodynamique de l'eau et de l'air humide est réalisée via le modèle COOLPROP [21].

Le premier résultat de la modélisation est l'établissement des consommations énergétiques du procédé, comprenant la répartition entre les différentes pertes et l'énergie utile. Ces consommations sont établies sur l'année. À partir de celles-ci, il est regardé les enjeux environnementaux (émissions de CO₂) et économiques pour différents scénarios fixes du prix de l'énergie.

L'analyse technico-économique permettra de comparer les investissements initiaux avec les économies opérationnelles et les avantages environnementaux, offrant ainsi un aperçu clair des retours sur investissement immédiats associés aux différents cas d'hybridation.

3.1.4. Hypothèses communes

Les hypothèses communes reprises dans les études de cas concernent le poids carbone et le prix des énergies. Pour le poids carbone considéré, il correspond aux données de la base carbone ADEME [22] de l'année 2022 pour la France et sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Poids carbone des énergies utilisées pour les études de cas

Vecteur énergétique	Poids carbone
Electricité	52 gCO ₂ eq/kWhelec
Gaz naturel	239 gCO ₂ eq/kWhPCI ou 215 gCO ₂ eq/kWhPCS

Pour les prix de l'énergie utilisés pour les analyses technico-économiques des différentes études de cas, trois scénarios sont proposés. Chacun s'appuie sur un ratio entre les prix du gaz et de l'électricité différent qui correspond à une tendance observée dans différents pays d'Europe. Le but ici est d'étudier différentes configurations de prix des marchés de l'énergie plutôt que de réaliser des projections sur l'évolution des marchés de l'énergie sur le long terme. Les tarifs considérés s'appuient sur des pays avec des mix énergétiques divers présentant un poids carbone différent, et le prix du poids carbone est considéré intégré dans les coûts par souci de simplification. La carte Figure 7 (§2.1.1.3) présente les différents ratios entre les prix de l'électricité et du gaz observés pour différents pays d'Europe. Ainsi, les 3 scénarios de prix considérés sont représentatifs des marchés de l'énergie français, allemand et portugais et sont présentés dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Les coûts de l'énergie utilisés pour les 3 scénarios considérés (toutes taxes associées comprises, dont la taxe carbone – source Eurostat)

Scénario	Prix du gaz €/MWh	Prix de l'électricité €/MWh
S1 – France	50	100
S2 – Allemagne	70	215
S3 - Portugal	80	110

3.2. Cas 1 : Four de fusion pour la métallurgie (H2)

3.2.1. Situation de référence

3.2.1.1. Définition du procédé

Le cas métallurgie se concentre sur l'étude d'un four de fusion de métal dans le domaine du travail de l'aluminium. Le secteur de la métallurgie de l'aluminium représente le deuxième secteur le plus émetteur de CO₂ (cf. partie 3.1.2). Ce type de four est principalement utilisé en amont de la filière pour préparer du métal sous forme liquide avant d'être travaillé et coulé dans des moules pour produire les pièces métalliques destinées à l'élaboration de produits notamment pour l'industrie de l'aéronautique, l'automobile ou encore le bâtiment.

Le four étudié fonctionne en mode batch c'est-à-dire que les pièces brutes d'aluminium issues généralement de filières de recyclage ou d'aluminium neuf sont introduites dans l'enceinte du four via une porte amovible. L'enceinte est chauffée directement à l'aide de plusieurs brûleurs alimentés au gaz naturel de réseau. La consigne de température est réglée à environ 1 000 °C. La durée de chauffe est maintenue jusqu'à la fusion complète du métal. Le métal liquide est ensuite récupéré par gravité soit par ouverture du four sur sa partie basse ou soit par basculement de celui-ci.

Avec ce type d'équipement, il est important de pouvoir chauffer rapidement la matière afin de tenir la cadence requise pour la fabrication des pièces. La combustion par brûleur gaz offre l'avantage d'une montée en température rapide du métal, liée à la flamme qui génère en début de chauffe un effet convectif permettant d'accélérer le chauffage.



Figure 26 : Illustration d'un four de fusion à chargement frontal

Les principales hypothèses retenues pour la modélisation du four de l'étude de cas métallurgique sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Hypothèses de modélisation du cas de four métallurgique

PRODUIT	
Débit de métal traité	7 250 kg/h (Charge par batch de 50 tonnes)
Puissance installée	8 000 kW
Température enceinte	1 000 °C
Énergie de chauffe	Gaz de réseau (combustion directe par brûleurs)
Comburant	AIR
Durée d'un cycle	Environ 7 heures
Puissance moyenne d'un batch de fusion	4 000 kW
Récupération de chaleur	Sans
Nombre d'heures de fonctionnement	7500 h
IPE	610 kWh/t

3.2.1.2. Schéma de synthèse

La modélisation de la situation de référence du cas d'étude peut être schématisée dans la Figure 27 ci-dessous. Le four est représenté par une enceinte fermée chauffée par une combustion gaz. La charge repose sur la sole du four. Les fumées de combustion sont évacuées par une cheminée.

Cas base : Gaz réseau 100 % CH₄

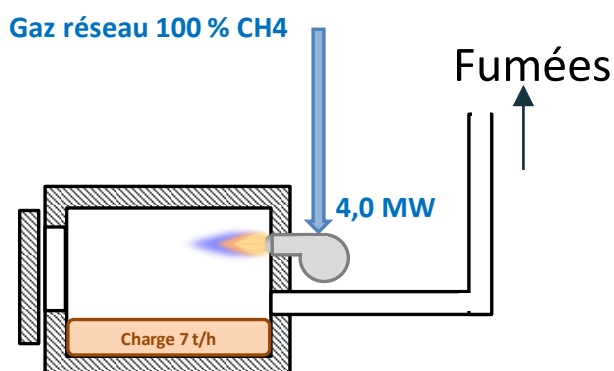


Figure 27 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du four métallurgique

Le mode de chauffage pendant un cycle peut être modélisé de la façon suivante :

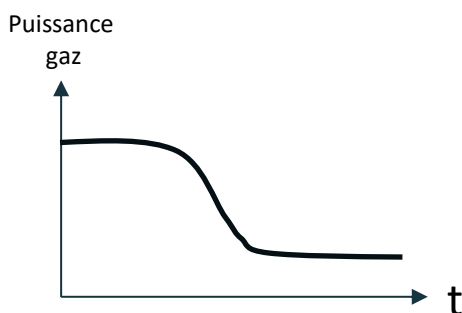


Figure 28 : Evolution de la puissance du four pour un cycle de fusion

La puissance de chauffe des brûleurs est maximale pendant la première partie du cycle de chauffage lorsque le métal est encore froid. Elle décroît ensuite pour atteindre un palier à puissance réduite lorsque le métal a atteint la température de fusion. La puissance du four est alors réduite, elle correspond globalement à la puissance permettant de maintenir le four en chauffe. Le métal est conservé liquide jusqu'à l'opération de vidage. La période de maintien peut être plus ou moins longue en fonction des contraintes de production. Dans la pratique, le site industriel possède généralement plusieurs fours fonctionnant en alternance pour lui permettre d'assurer un flux de métal continu.

3.2.1.3. Bilan énergétique

À partir du modèle, la répartition des consommations énergétiques du four est déterminée. Le modèle est établi de telle façon à être représentatif d'un four industriel à haute température. La puissance de chauffe moyenne sur la durée d'un cycle est de 4 000 kW gaz. Le rendement thermique du four est de 35 %, ce qui correspond à l'énergie utile captée par le métal pour sa fusion.

En raison du niveau de température élevée, les pertes fumées issues de la combustion (pertes de chaleur par la cheminée) sont généralement le premier poste de pertes thermiques (38 %). Dans l'étude, le four n'est pas équipé d'un système de récupération de chaleur. Un tel système de récupération de chaleur en préchauffant l'air comburant des brûleurs permet de réduire environ de moitié ces pertes fumées de 38 % à 19 % (Figure 29) et de diminuer la puissance moyenne du four de 4 000 kW à 3 250 kW.

Les pertes parois du four et de la cheminée représentent 17 % de la puissance totale. Les pertes aérodynamiques mentionnées dans le bilan correspondent aux pertes d'énergies par les défauts d'étanchéité du four, notamment celles correspondant à la zone de jointure de la porte de chargement.

BILAN ENERGIE 4000 kW

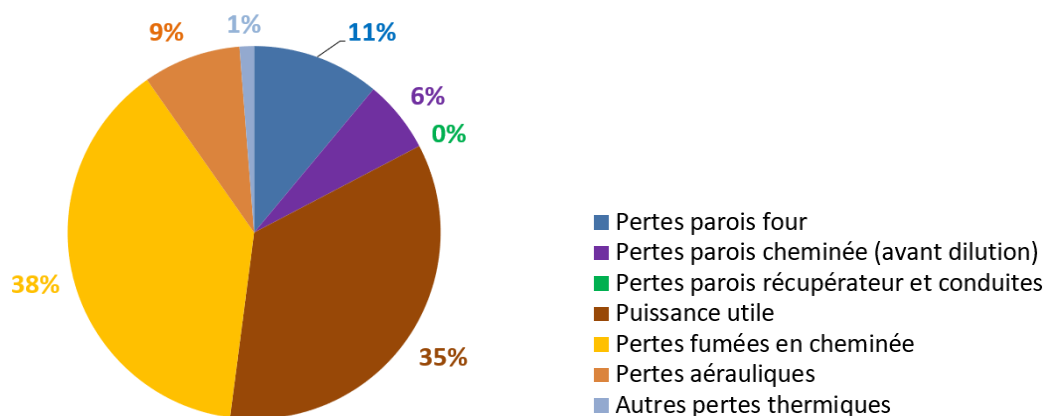


Figure 29 : Bilan énergétique du four (4000 kW)

3.2.2. Hybridations considérées

La proposition d'hybridation étudiée ne prend pas en compte d'actions d'amélioration de l'efficacité énergétique (système de récupération par exemple), mais plutôt une transition de la consommation de gaz vers une combinaison de combustibles gaz et hydrogène (H_2) à bas poids carbone et à isopuissance.

Effet sur le rendement thermique du four : le remplacement du combustible gaz par le combustible H_2 a été considéré comme n'ayant pas d'impact sur le rendement du four, en particulier sur les pertes fumées. Bien que légèrement réduites en faveur de l' H_2 de quelques %, celles-ci ont été considérées identiques quel que soit le pourcentage d' H_2 . En effet, si le volume de fumées apparaît plus faible avec une combustion H_2 , la quantité d'eau plus importante générée par la combustion hydrogène tend à augmenter les pertes thermiques liées à une capacité thermique des fumées accrue. Les deux paramètres ayant globalement tendance à se compenser, le rendement thermique du four est gardé identique, quel que soit le taux d'hybridation.

Le besoin énergétique demeure donc le même par rapport à la situation de référence. Seul le vecteur de la source d'énergie est modifié.

3.2.2.1. Cas d'hybridation à l'hydrogène

Trois solutions d'hybridation à l'hydrogène sont étudiées : le taux d'hybridation à l'hydrogène souhaité définit les modifications nécessaires et les investissements à effectuer.

Cas n°1 : taux d'hybridation H_2 à 25 % - Fourniture H_2 continue (Figure 30)

L'injection de combustible H_2 est de 25 % maximum, afin de minimiser l'investissement et les modifications techniques à apporter sur le four. Cela correspond au seuil d'injection d' H_2 maximum acceptable : le remplacement des brûleurs du four n'est pas nécessaire, la technologie d'un brûleur existant fonctionnant au gaz naturel reste technologiquement compatible.

L' H_2 décarboné est produit **en continu** par un électrolyseur externalisé utilisant une électricité bas carbone. Le modèle économique est donc une production de combustible H_2 externalisée dont l'investissement n'est pas supporté par l'industriel utilisateur du four.

Pour un taux d'hybridation de 25 %, la puissance H_2 délivrée au four est de 1 MW. En considérant un rendement de production d' H_2 au niveau de l'électrolyseur supposé à 77 %, une puissance électrique de 1,3 MW est nécessaire.

Cas 1 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H₂ 25 % sur 7500 heures/an

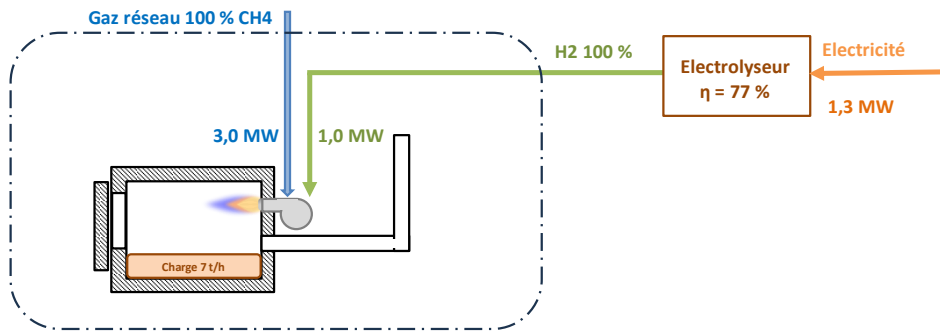


Figure 30 : Schéma de principe de l'hybridation H₂ à 25 %

Cas n°2 : taux d'hybridation H₂ à 50 % - Fourniture H₂ continue (Figure 31)

L'injection **en continu** de combustible H₂ est augmentée et portée à 50 %. Le changement de technologie du brûleur doit être réalisé pour permettre une combustion en toute sécurité du combustible.

Comme pour le cas précédent, l'H₂ décarboné est produit par un électrolyseur externalisé utilisant une électricité à faible poids carbone. Le modèle économique est donc une production de combustible H₂ externalisée dont l'investissement n'est pas supporté par l'industriel utilisateur du four.

Pour un taux d'hybridation de 50 %, la puissance H₂ délivrée au four est portée à 2 MW. En considérant le même rendement de production d'H₂ au niveau de l'électrolyseur supposé à 77 %, une puissance électrique de 2,6 MW est nécessaire.

Cas 2 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H₂ 50 % sur 7500 heures/an

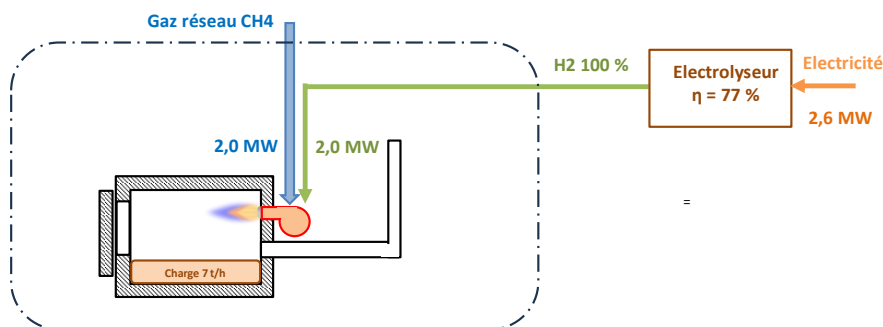


Figure 31 : Schéma de principe de l'hybridation H₂ à 50 %

Cas n°3 : fourniture H₂ en période de production électrique à bas coût (Figure 32)

L'injection de combustible H₂ est réalisée seulement lorsque le prix de production électrique est économiquement avantageux.

Comme pour le cas précédent, l' H_2 décarboné est produit par un électrolyseur externalisé utilisant une électricité à faible poids carbone. Le modèle économique est donc une production de combustible H_2 externalisée dont l'investissement n'est pas supporté par l'industriel utilisateur du four.

L'usage à 100 % d' H_2 pendant les périodes où l'électricité est à coût réduit nécessite la mise en place d'un électrolyseur plus puissant, permettant de produire la totalité de la puissance thermique nécessaire. La puissance H_2 délivrée par l'électrolyseur est portée à 4 MW, soit en considérant le même rendement de production d' H_2 au niveau de l'électrolyseur supposé à 77 %, une puissance électrique nécessaire de 5,2 MW. Le changement de technologie du brûleur s'impose également pour que la combustion à 100 % ait lieu en toute sécurité.

Pour l'analyse technico-économique qui suit, la possibilité de fonctionnement avec un combustible H_2 produit par une électricité bas carbone et à faible coût a été considérée à 500 h/an.

Cas 3 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H_2 100 % sur 500 heures/an (Coût élec bas)

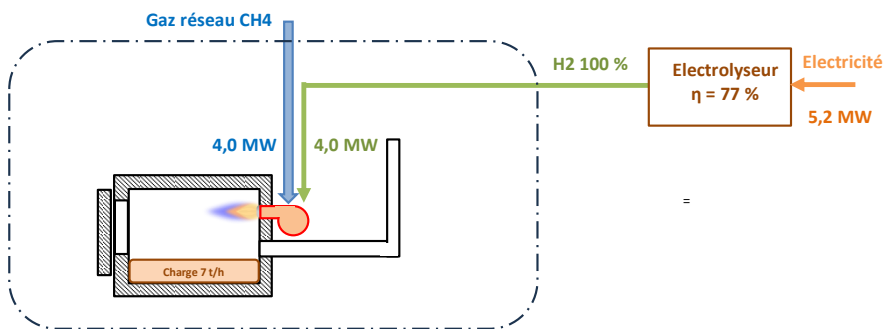


Figure 32 : Schéma de fourniture H_2 en période de production électrique à bas coût

3.2.3. Analyse

L'analyse technico-économique des solutions d'hybridations H_2 proposées dans cette étude de cas est réalisée sur une année standard, sans prendre en considération de projection à long terme du marché de l'énergie.

Les hypothèses permettant de réaliser l'analyse technico-économique sont rappelées ci-dessous :

- Consommation annuelle du four : 33 GWh/an (7500 h/an).
- Coûts des énergies scénario 1 France uniquement
 - Ratio Elec/Gaz naturel de réseau : 2,0
 - Coût du gaz naturel : 50 €/MWh
 - Coût de l'électricité : 100 €/MWh
- Modèle économique de l'électrolyseur.
 - η de transformation élec/ H_2 : 77 %
 - Vente à l'industriel d' H_2 avec une marge à 22 %
 - Coût H_2 induit 158 €/MWh soit 4,8 €/kg H_2

- Coût de la tonne de CO₂ : 80 €/t. Ce coût de la tonne de CO₂ émise a été introduit dans l'analyse comme un coût supplémentaire permettant de simuler une situation future où l'industriel devrait s'acquitter de ce coût carbone.
- Le poids carbone d'H₂ est calculé à 67 g/MWh. Il est calculé compte tenu du rendement de l'électrolyseur et du poids carbone de l'électricité considéré à 52 g/MWh.
- Les investissements (brûleurs et équipements connexes d'adaptation à la combustion H₂) ont été lissés sur 30 ans.

Le Tableau 6 ci-dessous résume les résultats obtenus pour le cas de référence et les trois cas d'hybridations proposés, les taux d'hybridation, les émissions de CO₂ en intégrant les hypothèses de fonctionnement (période de fonctionnement, poids carbone des vecteurs énergétiques...).

Tableau 6 : Analyse technico-économique four hybridé H₂

Combustible		GN (CH ₄)	Hybridation GN + H ₂		
Technique d'hybridation		-	Fourniture mélange GN + H ₂ sur 7500 h/an	Fourniture mélange GN + H ₂ sur 7500 h/an	Fourniture GN 100 % sur 7000 h/an H ₂ 100 % sur 500 h/an
Taux d'hybridation		-	25 % H ₂ 75 % GN	50 % H ₂ 50 % GN	7 % H ₂
Coût du GN		50	50	50	50
Coût H ₂		-	158	158	52
Coût énergie		1 660	2 584	3 508	1 732
Coût carbone (80 €/t)		635	525	410	606
Coût total		2 295	3 109	3 918	2 338
Émission CO ₂		7 943	6 560	5 123	7 581
		-	-17 %	-35 %	-5 %
Adaptation brûleur		-	0	100	100
Adaptation ligne gaz		-	100	100	100
Investissement		-	100	200	200
Financement 50 %		-	50	100	100
Coût supplémentaire annuel		-	+817	+1 630	+50
		-	+36 %	+71 %	+2 %
Coût d'abattement du CO ₂		-	+591	+578	+137

En résumé :

- 1) Les coûts actuels des énergies conventionnelles (électricité et gaz naturel de réseau) ne permettent pas une rentabilité économique immédiate d'une hybridation au combustible H₂. Le ratio de 2 du coût électricité/gaz est trop élevé pour permettre un coût de l'H₂ compétitif (le ratio gaz naturel/H₂ étant ici supérieur à 3). Le gain financier lié à un coût de la tonne carbone à 80 € ne permet pas de compenser le coût de production de l'hydrogène³.
- 2) Il est à noter toutefois la relative bonne performance économique du **cas 3** en mode basculement à 100 % H₂ qui atteint presque le seuil de rentabilité avec un coût de l'hydrogène à 52 €/MWh, mais le taux de baisse d'émission de CO₂ est faible : -5 %. Il est lié à une hybridation très partielle de 7 % en moyenne (seulement 500 h/an de disponibilité d'H₂ à faible coût).
- 3) Le **cas 2** permet avec un taux d'hybridation de 50 % d'H₂ en mode continu un abattement très significatif de 35 % d'émission de CO₂, soit en valeur absolue -2 820 t/an.
- 4) Concernant l'aspect technologique de l'hybridation à l'H₂, si le taux d'H₂ est inférieur à 25 % et que le changement de brûleur n'est pas nécessaire, l'équipement existant peut globalement s'adapter sans modification technique majeure. D'une manière générale des équipements connexes sont nécessaires tels qu'une ligne de distribution d'hydrogène depuis l'électrolyseur.
- 5) La puissance du four étudié est telle que le dimensionnement en puissance de l'électrolyseur est très conséquent (à minima 1,3 MW électrique pour un taux de 25 % d'H₂). En l'état des développements techniques actuels, les technologies de stockage hydrogène de grandes capacités n'apparaissent pas suffisamment matures pour permettre de réduire la puissance de ces équipements et donc le coût des puissances installées des électrolyseurs.

³ La rentabilité des cas d'hybridation H₂ à 25 ou 50% par rapport au gaz naturel n'est atteinte qu'avec un coût de la tonne carbone supérieur à 650 €/t, avec les hypothèses considérées.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

3.3. Cas 2 : Four tunnel le secteur matériaux (élec)

3.3.1. Situation de référence

3.3.1.1. Définition du procédé

Le cas matériaux concerne un four de cuisson de tuiles et briques dans le domaine du travail de la terre cuite. Les pièces tuiles ou briques sont préparées et formées à partir de terre crue. Elles sont ensuite séchées à l'intérieur d'un tunnel de séchage de telle façon à extraire l'eau présente dans la terre crue. À l'issue de ce traitement, les produits secs (< 3 % d'humidité) sont prêts pour l'étape de cuisson dans un four à haute température > 1000 °C fonctionnant à l'énergie gaz naturel.

Le four étudié est de type tunnel et fonctionne en mode continu, c'est-à-dire que les pièces (tuiles ou briques) sont introduites d'un côté du four via une porte amovible automatique et sont déchargées par le côté opposé via une ouverture automatique. L'enceinte est chauffée directement à l'aide de plusieurs rangées de brûleurs alimentés au gaz naturel situés en zone centrale du four tunnel. La consigne de température est régulée autour de 1 000 °C à 1 200 °C en fonction du type de produit à cuire. La durée de séjour des produits dans le four est longue (plusieurs heures), afin de chauffer et refroidir les produits selon une courbe de montée et de descente en température établie pour garantir la qualité de la cuisson. Cela conduit à des équipements four de grandes dimensions jusqu'à 100 mètres de longueur.

Ces équipements de cuisson sont conçus de telle façon à profiter de la chaleur de refroidissement des tuiles et briques sortantes pour préchauffer celles entrantes via une circulation d'air à contre-courant. La technologie de transfert de chaleur essentiellement par effet convectif nécessite l'usage incontournable d'une combustion gaz qui rend difficile l'électrification à 100 % du moyen de chauffage.



Figure 33 : Illustration d'un four tunnel matériaux (source : ICV)

Les principales hypothèses retenues pour la modélisation du four de l'étude de cas matériaux sont reprises dans le tableau ci-dessous. Ce type de fours produit des tonnages très conséquents et possède des puissances de chauffe généralement très importantes.

Tableau 7 : Hypothèses de modélisation du cas de four tunnel

PRODUIT	
Débit de tuiles traité	10 t/h (Charge par batch de 50 tonnes)
Puissance installée	7 000 kW
Température enceinte	1 100 °C
Énergie de chauffe	Gaz de réseau (combustion directe par brûleurs)
Comburant	AIR
Durée d'un cycle	Environ 20 heures
Puissance moyenne d'un batch de fusion	5 000 kW
Récupération de chaleur évacuation fumées	Externe vers le séchoir
Nombre d'heures de fonctionnement	7500 h
IPE	500 kWh/t

3.3.1.2. Schéma de synthèse

La modélisation de la situation de référence du cas d'étude peut être schématisée dans la Figure 34 ci-dessous. Le four est représenté par une enceinte fermée de forme tunnel chauffée par une combustion gaz en partie centrale.

La charge repose sur une sole amovible et se déplace tout au long du tunnel. Les fumées de combustion sont évacuées par une cheminée en tête de four. Les produits montent en température selon une pente régulée dans la zone dite « d'avant feu », via une circulation d'air à contre-courant chauffé en partie centrale. La chauffe est réalisée par des brûleurs situés en zone de feu en partie centrale. Les produits atteignent alors leur température maximum et sont maintenus en palier de température. Ils circulent ensuite dans la zone de refroidissement pour être refroidis de manière contrôlée grâce à une circulation d'air introduit à contrecourant à la sortie du four.

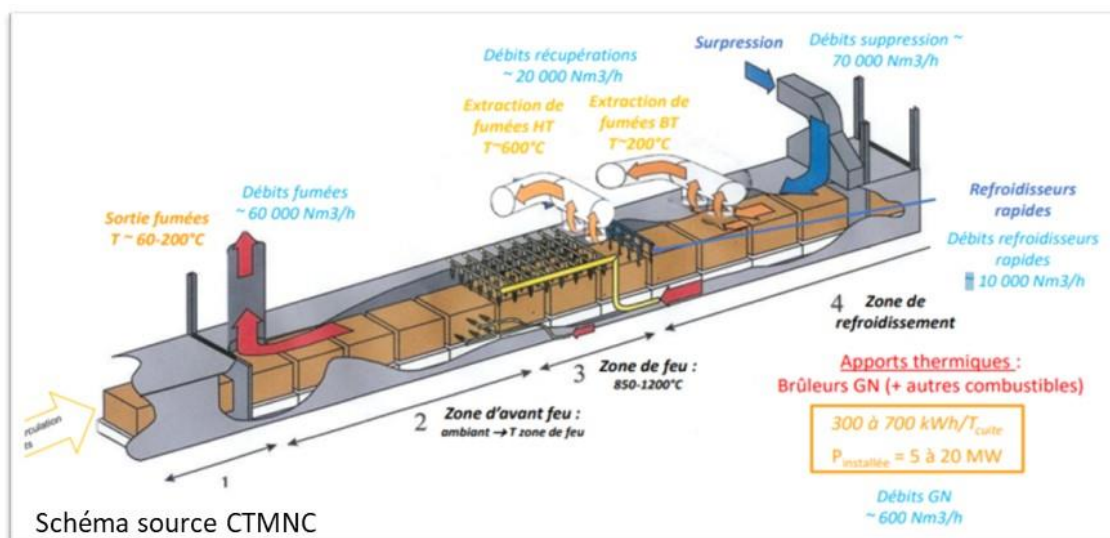


Figure 34 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du four métallurgique

3.3.2. Hybridation considérée

Comme pour les cas précédents, la proposition d'hybridation étudiée ne prend pas en compte des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique, mais plutôt une transition de la consommation de gaz vers une combinaison de combustibles gaz et une électrification partielle bas carbone.

Le besoin énergétique demeure donc le même par rapport à la situation de référence. Seul le vecteur de la source d'énergie est modifié.

Le cas d'hybridation considéré vise à électrifier la zone 2 d'avant feu (voir Figure 35) où les niveaux de température sont généralement $< 600^{\circ}\text{C}$. Ces températures restent acceptables pour le remplacement des brûleurs de cette zone par un système électrifié ventilé permettant de reproduire le transfert de chaleur convectif nécessaire pour garantir la rapidité et l'homogénéité de chauffe des produits.

Le taux d'électrification espéré est donc d'environ 1/6 (17 %) de la puissance gaz totale du four, correspondant à la puissance de chauffe des brûleurs généralement présents dans cette zone pour booster le réchauffage des produits en compléments de l'air chaud circulant à contrecourant.

Pour une puissance de 5 MW et **un taux d'hybridation de 17 %, la puissance électrique est de 850 kW.**

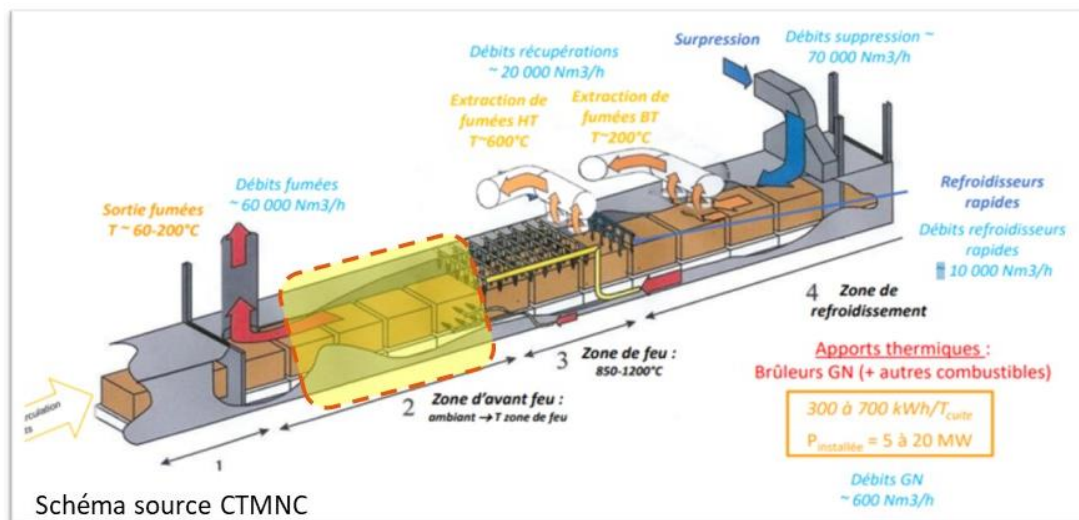


Figure 35 : Schéma d'hybridation électrique du four tuiles et briques

Techniquement, la solution d'hybridation envisagée consiste à associer les éléments suivants :

- un ensemble de chauffage haute température par résistances électriques,
- un dispositif de circulation par ventilation à l'aide de ventilateurs adaptés à la haute température (pour assurer la circulation de l'air chaud tout autour des produits, en remplacement des brûleurs à gaz).

L'intégration du système de chauffage dépend de la structure du four et doit être adaptée au cas par cas. Il peut être entièrement déporté (voir exemple Figure 36) ou partiellement déporté, les résistances pouvant être directement implantées dans l'enceinte du four.

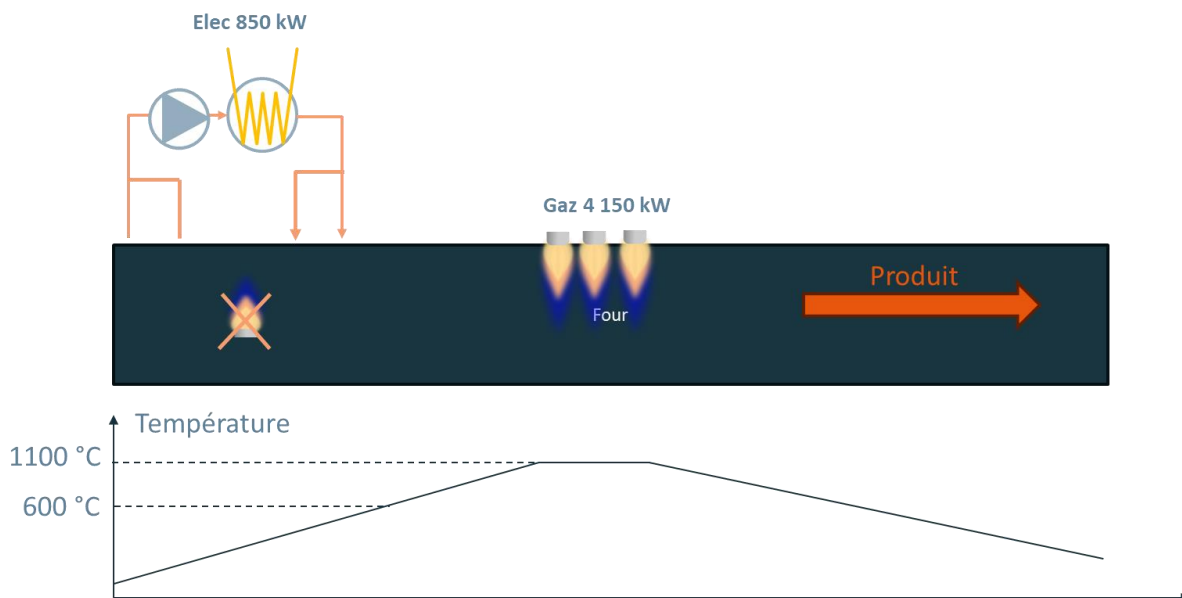


Figure 36 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du four

La modélisation du cas hybridé prend les mêmes hypothèses de production que le cas initial.

Dans le cas initial de référence, la puissance thermique du gaz consommé est de 5 MW, soit sur une base de 7500 h/an une consommation de gaz de 37,5 GWh/an.

Dans la situation hybridée à 17 % d'électrification, le mix énergétique se répartit de la façon suivante :

- Puissance électrique 850 kW, consommation électrique 6,38 GWh/an
- Puissance gaz 4 150 kW, consommation gaz 31,12 GWh/an

3.3.3. Analyse

L'analyse technico-économique de la solution d'hybridation électrique proposée dans cette étude de cas est réalisée sur une année standard, sans prendre en considération de projection à long terme du marché de l'énergie. En revanche, différents scénarios d'évolution des prix ont été réalisés (cf. partie 3.1.4).

Ainsi le Tableau 8 ci-dessous reprend pour le cas de référence et le cas d'hybridation proposé :

- les puissances nécessaires,
- les consommations d'énergie annuelle,
- les émissions de CO2 associées.

Les coûts d'énergie considérés prennent en compte les valeurs actuelles pour le scénario 1 français.

Tableau 8 : Résumé des données de sortie du cas de référence et du cas d'hybridation four matériaux

Donnée	Unité	<u>Cas de Référence :</u> Combustion 100 % GN	<u>Cas hybridé :</u> GN+Elec
Puissance électrique	kW	0	850
Puissance gaz	kW	5 000	4 150
Part d'hybridation	%	0 %	17 %
Consommation d'électricité	GWh/an	0	6,38
Consommation de Gaz	GWh/an	37,5	31,12
Consommation totale annuelle	GWh/an	37,5	37,5
Émission CO2	t/an	8 963	7 770
Coûts énergétiques	k€/an	1 875	2 194
CO2 évité	%	-	13 %
CO2 évité	t/an	-	1 192

Le bilan des investissements est présenté dans le Tableau 9 ci-dessous. Les coûts induits par la mise en place de cette solution sont estimés en prenant en compte l'installation de batteries thermiques électriques pour une puissance de 850 kW. Pour ce cas d'hybridation simple sans valorisation de chaleur fatale, il ne peut pas être considéré d'aide de financement.

Le calcul des coûts d'énergie prend en compte les coûts d'énergie actuels (scénario 1 France) ainsi que le coût de la tonne CO2. Le calcul du coût supplémentaire annuel inclut en revanche le prix de l'investissement lissé sur la durée de vie de l'installation, ici considéré de 15 ans.

Tableau 9 : Bilan des investissements du cas d'hybridation étudié pour l'étude de cas matériaux

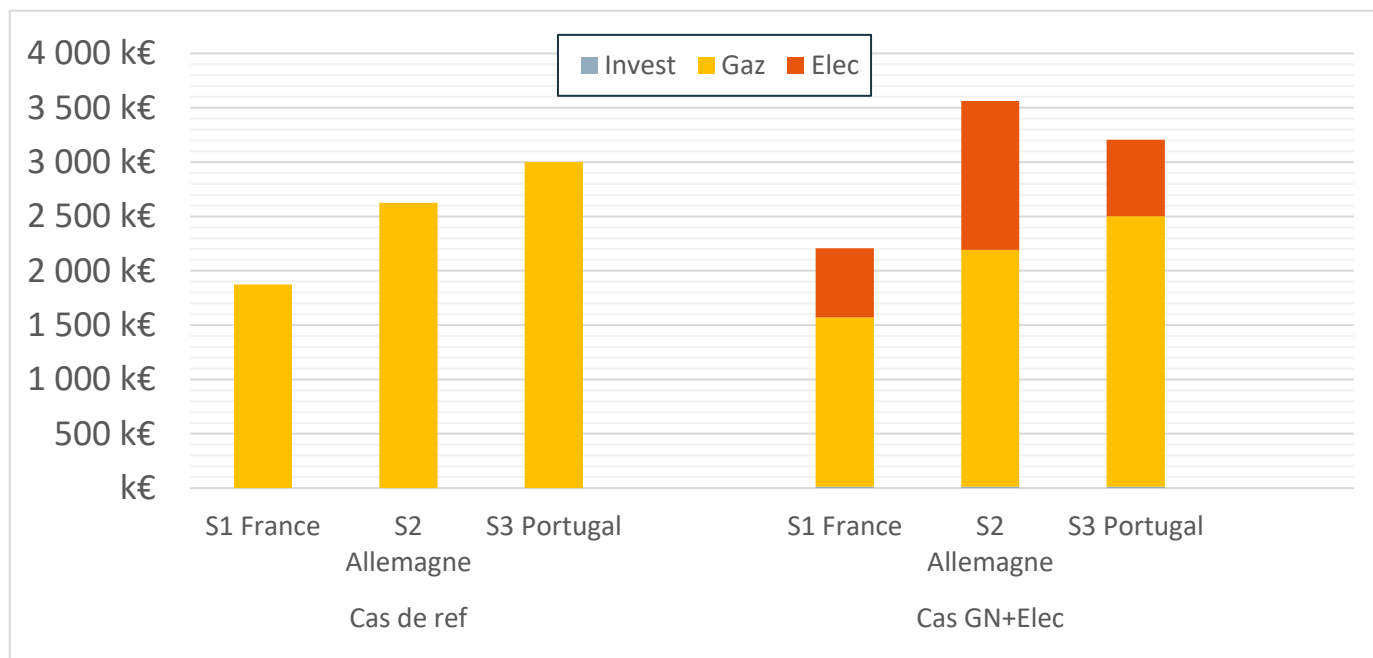
Donnée	Unité	<i>Cas hybridé : GN+Elec</i>
Investissement	k€	200
Coût d'énergie supplémentaire	k€/an	+319
Coût supplémentaire annuel (investissement lissé sur 15 ans)	k€/an	+332

Pour le cas hybridé le plus intéressant, les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous. Les coûts annuels d'énergie (gaz et électricité) et de l'investissement initial ramené à une année de fonctionnement sont présentés en Figure 48 ci-après.

Tableau 10 - Bilan financier de l'hybridation pour l'étude de cas matériaux

Donnée	Unité	<i>Cas hybridé : GN+Elec</i>		
		<u>S1 (France)</u>	<u>S2 (Allemagne)</u>	<u>S3 (Portugal)</u>
Investissement	k€	200	200	200
Coût supplémentaire	k€/an	+332	+938	+205
Coût supplémentaire	%	+18 %	+36 %	+7 %
Coût d'abattement du CO2	€/tCO2	+278	+786	+172

Finalement, la Figure 37 ci-dessous présente les coûts annuels d'énergie (gaz et électricité) et de l'investissement initial ramené à une année de fonctionnement. Cette analyse est présentée pour les 3 scénarios européens de coûts énergétiques présentés précédemment dans le


Tableau 4.
Figure 37 : Graphique des coûts énergétiques annuels pour le cas de référence et solutions d'hybridation pour les 3 scénarios de coût énergétique

Les résultats obtenus révèlent que :

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- L'hybridation électrique provoque une augmentation du coût énergétique annuel pour les trois scénarios européens (+ 7 à + 36 %).

Cette augmentation sera bien sûr bien plus atténuée si le ratio de coût électrique/gaz est faible comme c'est le cas pour le Portugal (S3), où l'écart entre le cas de référence et hybridé est quasiment équivalent.

- Le coût d'investissement est très faible comparé aux coûts énergétiques annuels.

En effet les hypothèses prises supposent un amortissement sur une durée de vie de 15 ans, ce qui représente un coût lissé de 13 k€/an. L'investissement initial de 200k€ peut sembler élevé, mais en considérant une installation avec un taux de fonctionnement élevé (7 500 h/an dans notre cas), les coûts d'investissement deviennent minimes par rapport aux coûts énergétiques induits tout au long de la durée de vie de l'équipement. Cela met en évidence l'importance et l'impact du choix des équipements à la conception du projet. À noter que le renforcement de la ligne électrique (transformateur supplémentaire par exemple) pour alimenter les batteries de chauffe électrique n'a pas été considéré dans le chiffrage de l'investissement.

- Le taux relativement faible d'hybridation à 17 % ne permet pas de générer des gains d'énergie, car le rendement thermique global du four n'est pas modifié significativement.

Enfin et pour conclure cette analyse, les émissions de GES (Figure 38) diffèrent selon les scénarios. Pour la France, la réduction des émissions de CO₂ est de 13 % soit 1 192 t/an évitées (avec le poids carbone du kWh avantageux). La situation s'en trouve inversée pour le cas de l'Allemagne où l'électrification va générer des émissions de CO₂ complémentaires écartant de fait l'hybridation électrique pour ce pays à moins de souscrire un contrat électrique garantie d'origine renouvelable.

Avec le poids carbone de l'électricité par pays :

Tableau 11 : Poids carbone des pays des scénarios

	S1 France	S2 Allemagne	S3 Portugal
Poids carbone électricité kg CO ₂ /MWh	52	430	182

Poids carbone du gaz considéré : 239 kg CO₂/MWh (France, élargi aux deux autres scénarios)

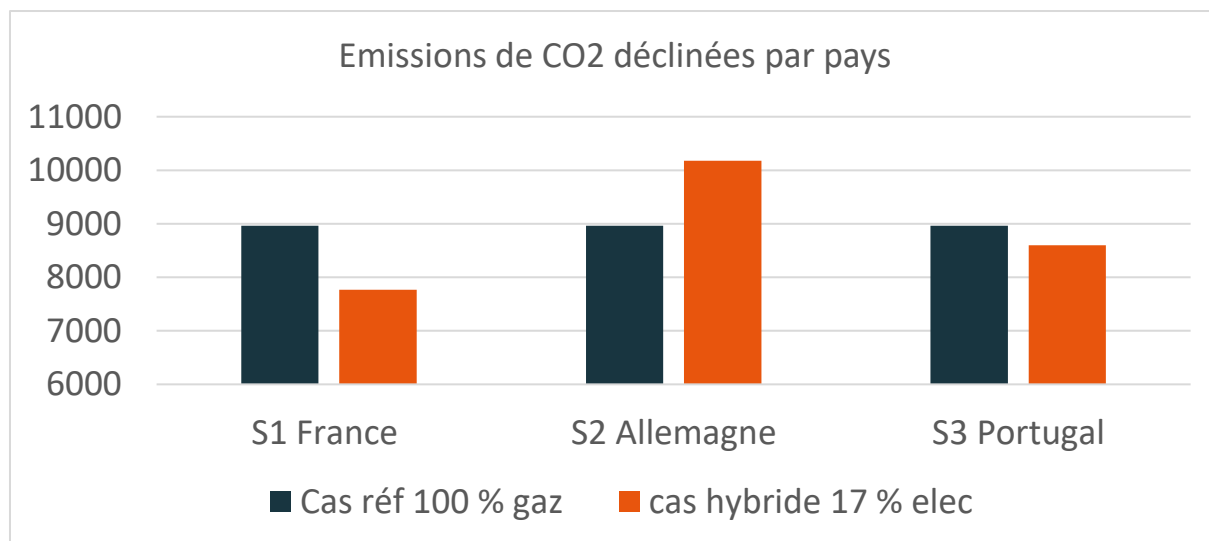


Figure 38 : Émissions de CO₂ comparées par pays pour le cas du four matériaux

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

3.4. Cas 3 : Sécheur rotatif dans le secteur de la chimie (élec)

3.4.1. Situation de référence

3.4.1.1. Définition du procédé

Le cas chimie se concentre sur l'étude d'un sécheur rotatif (cf. partie 3.1.2). Ce type de sécheur est principalement utilisé pour les produits chimiques, les engrais, les pellets de biomasse et minerais. Dans ce procédé, le produit à sécher est introduit dans un tambour cylindrique qui tourne sur son axe horizontal grâce à un système d'entraînement. À l'entrée du sécheur, un bruleur à gaz est utilisé pour chauffer de l'air sec et chaud qui est introduit dans le tambour. Le brassage induit par le tambour entre le produit et l'air de séchage permet d'extraire l'eau du produit. À la sortie du sécheur, le produit séché est extrait en respectant les critères d'humidité relative attendue. Parallèlement, l'air extrait ressort refroidi et chargé en humidité. Le cas étudié concerne le séchage d'engrais. Il prend en considération un premier étage de récupération sur les buées afin de respecter les bonnes pratiques en matière d'efficacité énergétique.



Figure 39 : Photo d'un sécheur à tambour rotatif (source : Lessine)

L'ensemble des hypothèses retenues pour la modélisation du séchage de l'étude de cas chimie sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 12 : Hypothèses de modélisation du cas de séchage

PRODUIT	
Débit traité	3 500 kg/h
Humidité relative à l'entrée	50%
Humidité relative souhaitée en sortie	3.5%

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

AIR DE SÉCHAGE	
Débit	25 000 kg/h
Température extérieure	24°C
Humidité extérieure	40%HR
APPORTS THERMIQUES	
Gaz	1 500 kW PCI
Récupération de chaleur	300 kW

3.4.1.2. Schéma de synthèse

La modélisation de la situation de référence du cas d'étude est schématisée dans la Figure 40 ci-dessous.

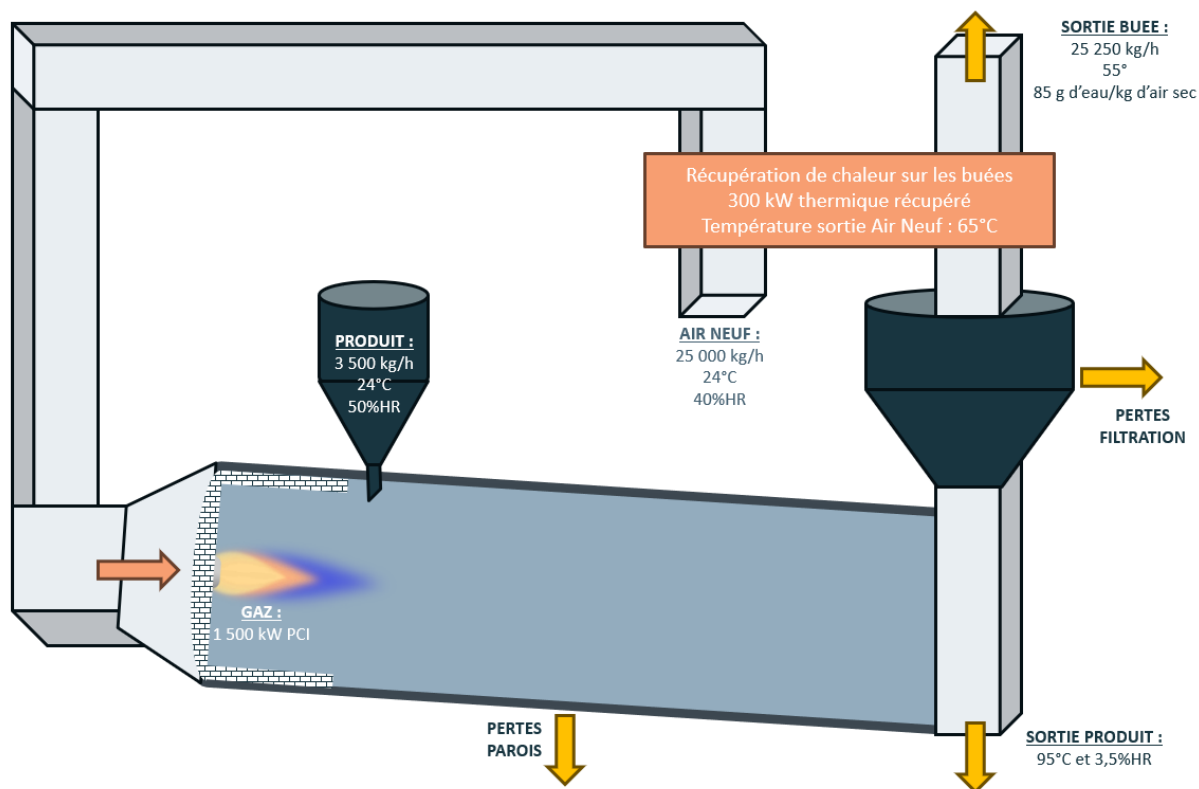


Figure 40 : Schéma de synthèse de la modélisation de la situation initiale du cas chimie

3.4.1.3. Bilan énergétique

À partir du modèle, la répartition des consommations énergétiques du procédé de séchage est déterminée. Elle est présentée en Figure 41 ci-dessous. Le gaz représente la part majoritaire, avec un apport de 1 500 kW de chaleur, ce qui couvre 83% des besoins énergétiques. La récupération vient compléter ce besoin avec une puissance thermique fournie de 300 kW, qui correspond à la part d'énergie sensible disponible en sortie du sécheur.

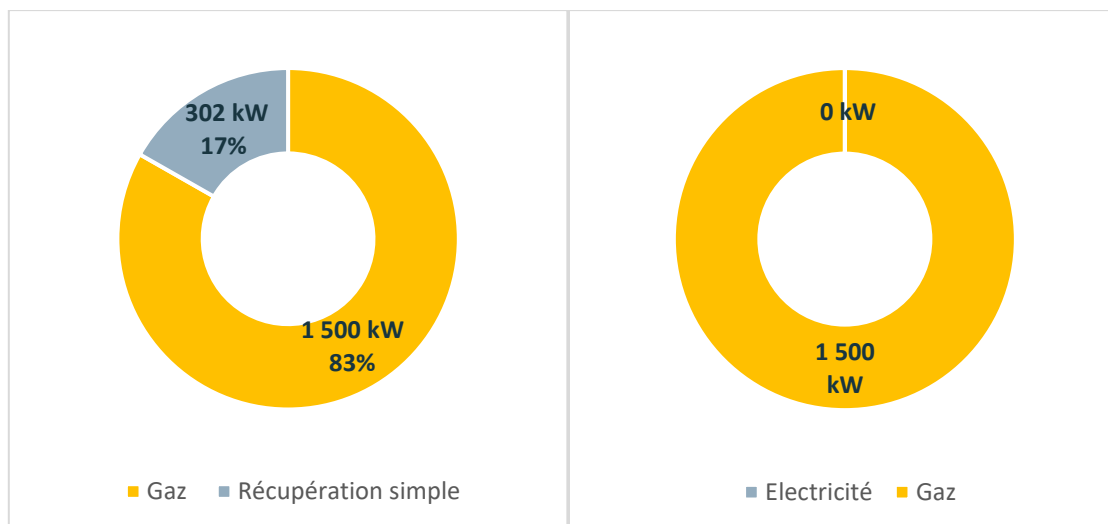


Figure 41 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas initial

La Figure 42 ci-dessous présente, les puissances utiles et récupérées ainsi que les puissances dissipées lors du procédé de séchage. Les puissances utiles et récupérées sont des puissances transmises dans le procédé. Les puissances dissipées correspondent à une puissance disponible par rapport à l'état de référence de l'air à l'ambiance (24°C et 40%HR).

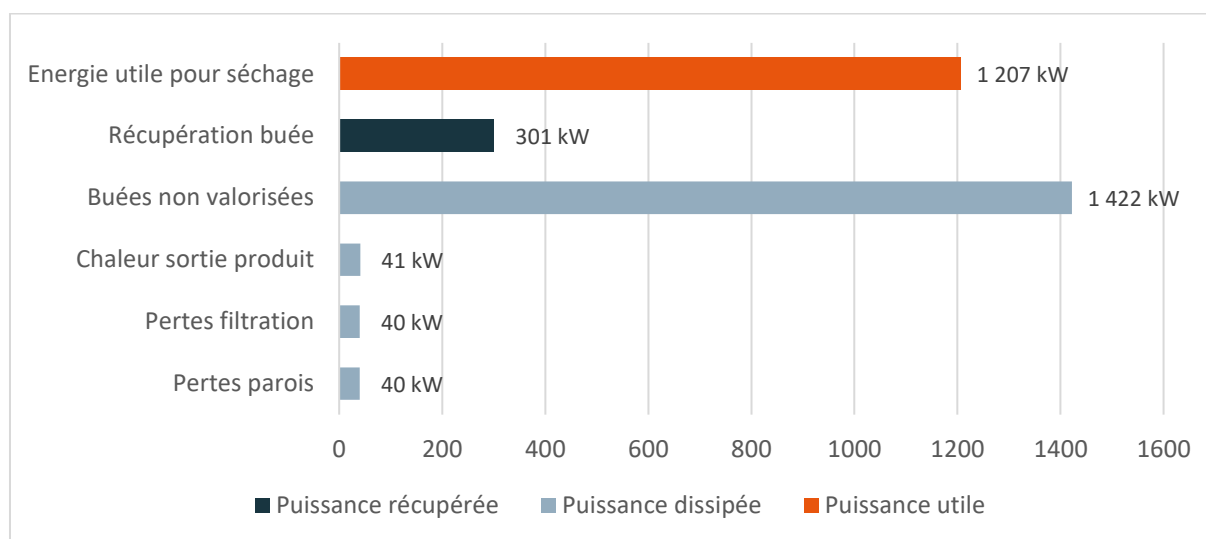


Figure 42 : Répartitions des puissances dissipées ou utiles mises en jeu dans le procédé de séchage pour le cas initial

La puissance utile nécessaire est de 1 200 kW. Il s'agit de l'énergie thermique requise pour vaporiser et extraire la quantité d'eau souhaitée du produit. Le rendement thermique du procédé est ainsi de

80%, calculé comme le ratio entre l'énergie utile (1 200 kW) et la consommation de gaz nécessaire (1 500 kW)⁴.

En parallèle de l'énergie utile développée, le procédé de séchage présente plusieurs vecteurs de dissipation de l'énergie qui sont les suivants :

- Les buées sont le gisement d'énergie le plus important extrait du procédé de séchage. Sur notre modèle, une partie de l'énergie contenue dans les buées a déjà été valorisée et réinjectée dans le procédé pour préchauffer l'air neuf. Il s'agit de l'énergie sensible disponible (abattement de la température des buées de 95°C à 55°C). En séchant le produit, l'air de séchage se charge en humidité et capte une part importante de l'énergie utile nécessaire pour le séchage du produit. En effet, lors du procédé de séchage, l'air de séchage va se refroidir tout en augmentant le poids d'eau qu'il contient, en passant de 7 g d'eau par kg d'air sec à 85 g d'eau par kg d'air sec. Ainsi son énergie sensible va baisser, mais son énergie latente va augmenter avec une température de rosée en sortie de sécheur qui atteint 50°C. Ainsi, si les buées sont refroidies jusqu'à cette température, une partie du poids d'eau qu'elles renferment va condenser tout en délivrant l'énergie latente comprise dans les buées. Dans le cadre de notre modélisation, l'énergie totale comprise dans les fumées représente 93.5% de l'énergie totale dissipée par le procédé de séchage.
- Le produit est le deuxième réceptacle de l'énergie utile développée dans le procédé de séchage. Il capte l'énergie sensible nécessaire pour monter en température afin d'atteindre un point de température propice à l'évaporation de l'eau qu'il contient. Lorsque le produit est extrait du sécheur, il extrait également l'énergie qui lui a été fournie pour atteindre sa température finale. Le plus souvent, le produit passe ensuite dans un refroidisseur afin de réduire sa température pour éviter les phénomènes de condensation. Il est possible de récupérer cette chaleur. Dans notre cas, elle s'élève à 40 kW et représente 2.6% de l'énergie dissipée dans le process.
- Les pertes représentent le dernier vecteur de dissipation de l'énergie développée dans le processus de séchage. On note dans un premier temps les pertes de paroi dans le sécheur. Celles-ci sont fonction de la différence de température entre le sécheur et l'air ambiant et de la qualité de l'isolation du sécheur. Sont également considérés les pertes sur les buées sur la partie filtration puis acheminement jusqu'au point de transfert d'énergie. Dans notre modélisation, nous avons fait l'hypothèse d'un sécheur bien isolé. Les pertes représentent 5.2% de l'énergie dissipée dans le process.

3.4.2. Hybridations considérées

La proposition d'hybridation étudiée ne prend pas en compte d'actions d'amélioration de l'efficacité énergétique, mais plutôt une transition de la consommation de gaz vers une combinaison de gaz et d'électricité. Le besoin énergétique demeure le même par rapport à la situation de référence. Seul le vecteur de la source d'énergie est modifié.

⁴ Note : si l'on excluait la récupération au premier étage de valorisation des buées, le rendement thermique chuterait à 65%.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

3.4.2.1. Première solution d'hybridation

La première solution d'hybridation envisagée consiste à mettre en place une pompe à chaleur haute température en tant que deuxième niveau de récupération sur les buées de séchage, afin de valoriser sa chaleur latente pour préchauffer l'air neuf de séchage à une température plus élevée. L'utilisation d'une pompe à chaleur permet de rehausser la source de chaleur latente encore disponible dans les buées (environ 50°C) pour préchauffer l'air neuf jusqu'à 130°C. Le schéma du cas d'hybridation proposé est présenté en Figure 43 ci-dessous.

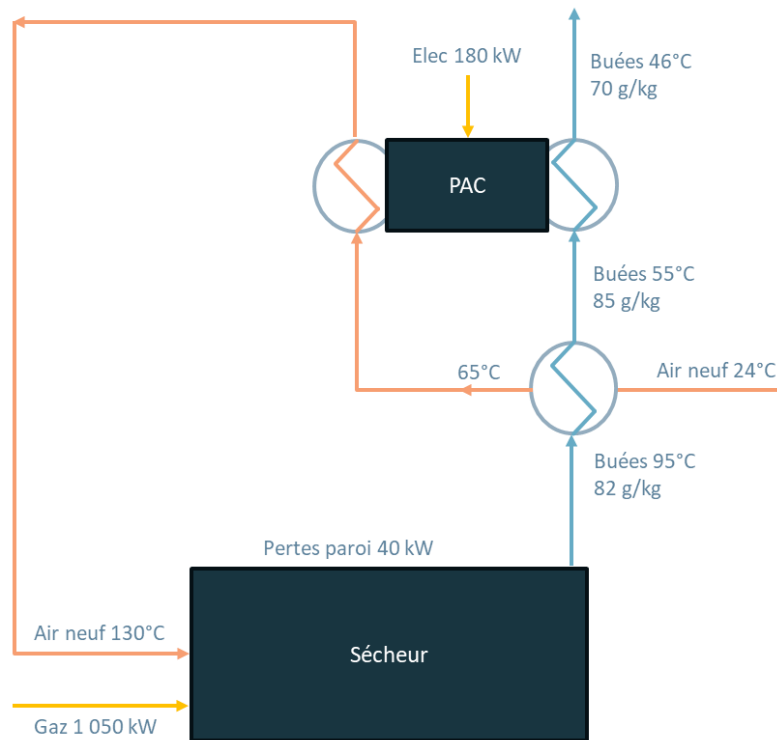


Figure 43 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du procédé de séchage via une pompe à chaleur

La modélisation du cas hybridé prend comme hypothèse d'entrée, les mêmes données de production que le cas initial. Concernant les performances de la pompe à chaleur, on prend l'hypothèse d'un COP de 2,5. Cette hypothèse se base sur les performances connues des technologies matures actuelles. On peut tout de même noter qu'il existe d'autres technologies, tel que les PAC en régime transcritique qui peuvent offrir des performances plus élevées avec des COP entre 3,5 et 4.

Une autre notion importante à considérer pour le cas d'hybridation avec une PAC est le phénomène de condensation. L'énergie latente des buées est valorisée et génère une condensation importante au niveau de l'évaporateur de la PAC. Dans le cas de l'exemple traité, il y a environ 8m3 de condensats générés par jours⁵. Attention, les condensats ne sont pas propres du fait de leur interaction avec le process. Ces derniers peuvent nécessiter d'être traité par une STEP avant d'être rejeté.

⁵ Un débit de 8m3 correspond à un filet d'eau de 6 litres par minute. À titre de comparaison, un robinet standard présente un débit de 12 litres par minute.

3.4.2.2. Deuxième solution d'hybridation

Une deuxième solution d'hybridation consiste uniquement à installer des batteries électriques pour réchauffer l'air sans valoriser les calories des buées. Cette option permet de comparer une hybridation en 100% électrique avec une hybridation avec une PAC qui propose une revalorisation de l'énergie dissipée dans le process de séchage. Pour permettre une comparaison des deux solutions d'hybridation, il est choisi de fixer la puissance des batteries électriques installées au même niveau que la puissance thermique fournie par la PAC, soit 450 kW. La Figure 44 ci-dessous résume au travers d'un schéma cette solution.

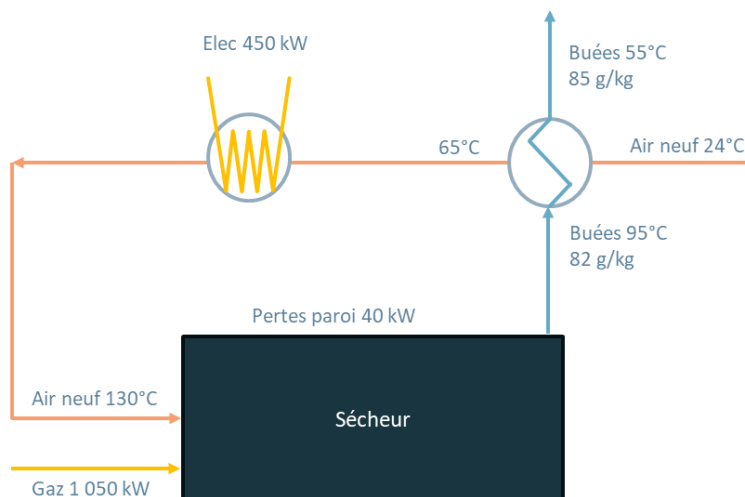


Figure 44 : Schéma de principe de l'hybridation électrique du procédé de séchage via des batteries électriques

3.4.2.3. Résultats des modélisations considérées

À partir du modèle, la répartition des consommations énergétiques des deux solutions d'hybridation électrique est déterminée. Elles sont présentées en Figure 45 et Figure 46. Dans les deux cas, la consommation de gaz en complément est abaissée à 1 050 kW et représente 58% des apports thermiques fournis au process. En revanche, avec l'utilisation d'une PAC, on réduit la consommation finale d'électricité du COP de la PAC utilisée, dans notre cas de 2,5. La puissance électrique nécessaire passe de 450 kW à 180 kW. De même, concernant les apports thermiques apportés à l'air neuf de séchage, plus de 40% proviennent de la récupération de chaleur sur les buées d'extractions, contre seulement 17% dans le cas d'une électrification avec des batteries électriques uniquement.

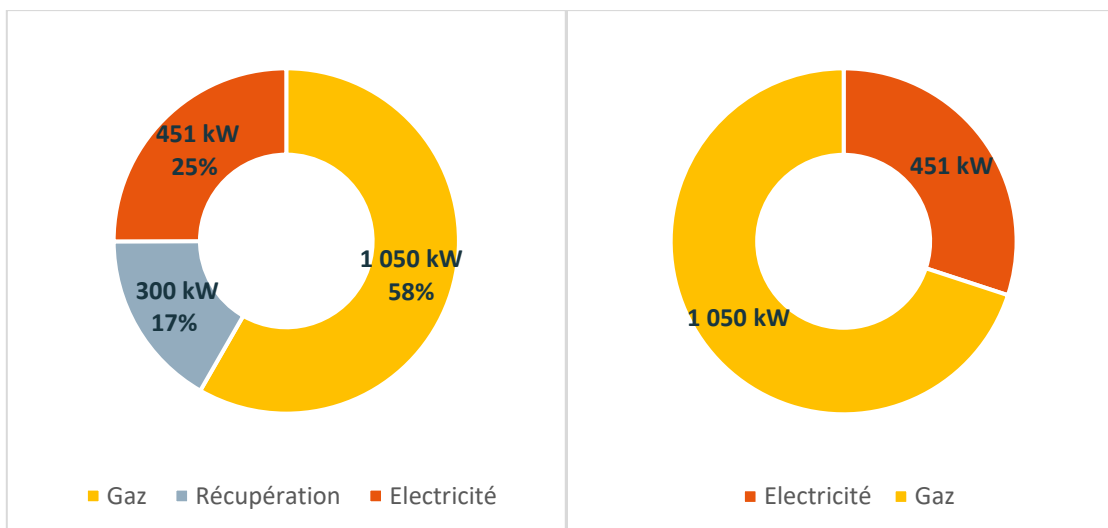


Figure 45 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas d'hybridation par l'installation de batteries électriques

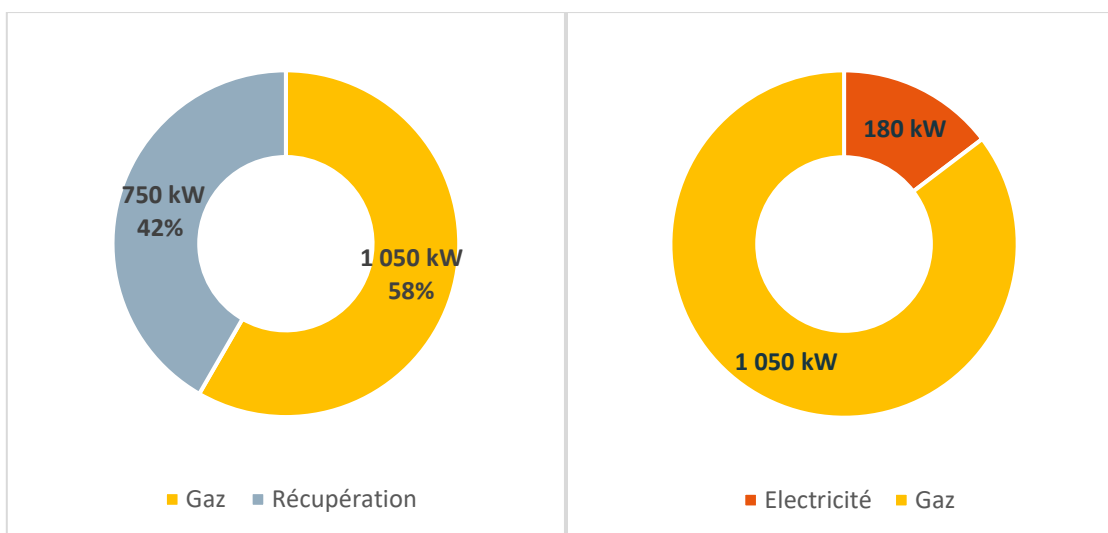


Figure 46 : Répartition des apports thermiques fournis à l'air de séchage (à gauche) et de l'énergie finale consommée (à droite) pour le cas d'hybridation électrique par l'installation d'une PAC

La Figure 47 ci-dessous présente, les puissances utiles et récupérées ainsi que les puissances dissipées lors du procédé de séchage dans le cas d'une hybridation avec une PAC. Les puissances utiles et récupérées sont des puissances transmises dans le procédé. Les puissances dissipées correspondent à une puissance disponible par rapport à l'état de référence de l'air à l'ambiance (24°C et 40%HR).

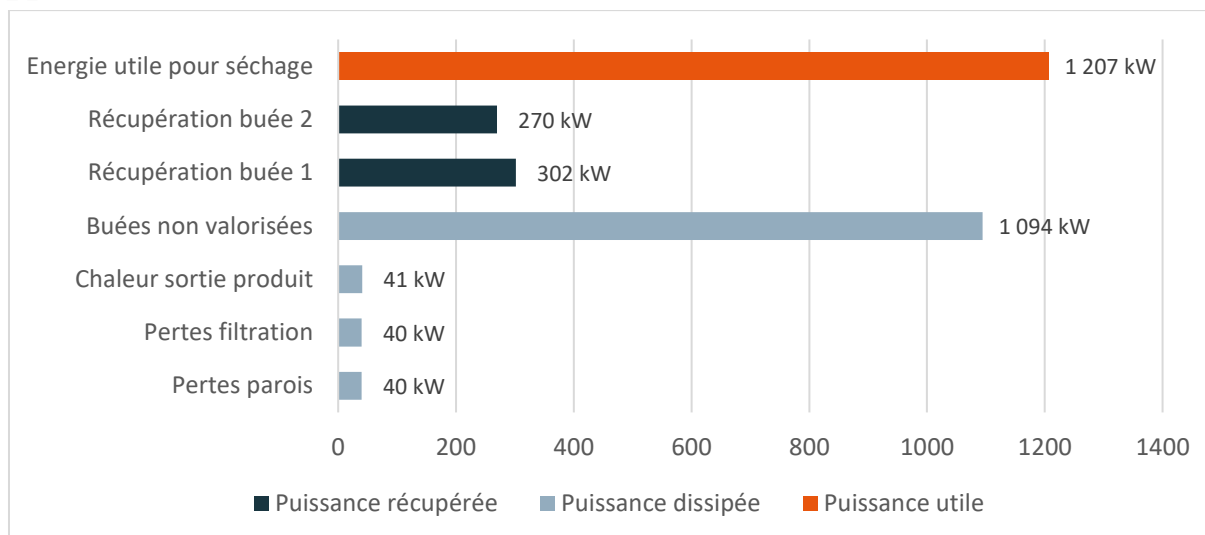


Figure 47 : Répartitions des puissances dissipées ou utiles mises en jeu dans le procédé de séchage pour le cas d'hybridation avec mise en place d'une PAC

La puissance utile nécessaire est toujours de 1 200 kW. Elle reste identique du fait que les besoins du produit sont inchangés. En revanche, le rendement thermique du procédé est lui nettement amélioré et passe à 98%, principalement grâce à la valorisation d'une partie de l'énergie dissipée dans le procédé.

Concernant les différents vecteurs de dissipations de l'énergie que sont les pertes et le produit, ils sont très peu impactés par l'hybridation. La seule légère différence réside dans le poids d'eau de l'air de séchage, légèrement plus faible, car la réduction de la part de gaz utilisé réduit également l'eau que la combustion apporte.

Le plus grand impact de l'hybridation réside dans l'énergie dissipée dans les buées d'extraction qui est réduite de la quantité d'énergie qui a été transmise pour préchauffer l'air neuf de séchage. Ainsi, l'énergie dissipée dans les buées passe de 1 420 kW dans le cas initial à 1 090 kW pour le cas d'hybridation. On retrouve tout de même un gisement d'énergie encore très important, dissipé dans les fumées. Ce dernier peut être valorisé pour d'autres usages de chaleur dans l'usine. En revanche, les niveaux de température du procédé de séchage ne permettent pas une valorisation plus importante sur cet usage. En effet, la solution d'hybridation par PAC permet une rehausse de la température de l'air neuf jusqu'à 130°C à partir d'une source de chaleur disponible à environ 45°C. On atteint ici la limite technologique des PAC actuelles. Il sera plus difficile de valoriser un delta de température (T lift) supérieur à 100°C.

On peut noter que pour l'hybridation avec des batteries électriques, la répartition des distributions d'énergies dissipées est très proche de celle de la Figure 42 qui présente les données du cas initial. En effet, étant donné que cette solution ne met pas en jeu de nouvelles récupérations de chaleur sur les gisements dissipés dans le procédé de séchage, la seule différence observée réside dans le poids d'eau légèrement plus faible de l'air neuf de séchage, du fait d'une quantité de gaz de combustion inférieure utilisée.

3.4.3. Analyse

L'analyse technico-économique des deux solutions d'hybridations proposées dans cette étude de cas est réalisée sur une année standard, sans prendre en considération de projection à long terme du marché de l'énergie. En revanche, afin de considérer différents scénarios d'évolution des prix qui ont été introduits en partie 3.1.4.

Ainsi le Tableau 13 ci-dessous résume pour le cas de référence et les deux cas d'hybridations proposés, les puissances nécessaires, les consommations d'énergie annuelle et les émissions de CO2 associées en intégrant les hypothèses de fonctionnement définies en paragraphe 3.1.4 (période de fonctionnement, poids carbone des vecteurs énergétiques...). Les coûts d'énergie considérés prennent en compte les valeurs actuelles pour le scénario 1 français.

Tableau 13 : Résumé des données de sortie du cas de référence et des deux cas d'hybridations étudiés pour l'étude de cas chimie

Donnée	Unité	<i>Cas de Référence :</i> Combustion 100% GN	<i>Cas hybridé :</i> GN+Elec PAC	<i>Cas hybridé :</i> GN+Elec
Puissance électrique	kW(pci)	0	180	451
Puissance gaz	kW(pci)	1 500	1 050	1 050
Puissance de récupération	kW(pci)	302	300	300
Part d'hybridation	%	0%	15%	30%
η thermique	%	80%	98%	80%
Consommation d'électricité	GWh(pcs)/an	0,00	1,35	3,37
Consommation de Gaz	GWh(pcs)/an	11,25	7,88	7,88
Consommation totale annuelle	GWh(pcs)/an	11,25	9,22	11,25
Émission CO2	t/an	2 689	1 952	2 057
Coûts énergétiques	k€/an	563	529	731
	€/tonne	21,4	20,1	27,8
CO2 évité	%	NA	27%	23%
	t/an	NA	737	631
IPE	kWh(pcs)/t	3,54	2,86	3,44

Enfin le Tableau 14 ci-dessous présente le bilan des investissements de l'étude de cas. Les coûts induits par la mise en place de ces solutions sont estimés en prenant en compte :

- Pour le cas d'hybridation avec valorisation des buées, l'installation d'une PAC d'une puissance thermique de 475 kW et son raccordement à l'installation actuelle. Au vu du contexte d'incitation financière actuel vis-à-vis des PAC et des projets de valorisation de chaleur fatale, il est estimé que des subventions permettent de réduire le budget d'investissement de 50% (en France le Fond Chaleur qui subventionne désormais la récupération sur le même procédé – cf. site ADEME [Réalisation d'installations de récupération de chaleur fatale page 4](#), et/ou cumulée avec une autre subvention CEE).

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

- Pour le cas d'hybridation en 100% électrique à l'aide de résistances thermiques, l'investissement considéré prend en compte l'installation de batteries thermiques pour une puissance thermique ou électrique de 475 kW. Pour ce cas d'hybridation simple sans valorisation de chaleur fatale, il n'est pas considéré d'aide de financement.

Le calcul des économies d'énergie prend en compte les coûts d'énergie actuels (scénario 1) ainsi que le coût de la tonne CO₂. Le calcul du coût supplémentaire annuel inclut en revanche le prix de l'investissement lissé sur la durée de vie de l'installation, ici considéré de 15 ans.

Tableau 14 : Bilan financier pour l'étude de cas chimie (scénario 1, cas France)

Donnée	Unité	<i>Cas hybridé :</i> GN+Elec PAC S1 - France	<i>Cas hybridé :</i> GN+Elec S1 - France
Investissement	k€	300 ⁶	200
Économie d'énergie	k€/an	+34	-168
ROI	an	9	-
Coût d'abattement du CO ₂ ⁷	€/tCO ₂	-19	+172

Pour le cas hybridé le plus intéressant, les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous. Les coûts annuels d'énergie (gaz et électricité) et de l'investissement initial ramené à une année de fonctionnement sont présentés en Figure 48 ci-après.

Tableau 15 - Bilan financier de l'hybridation PAC pour l'étude de cas chimie

Donnée	Unité	<i>Cas hybridé : GN+Elec PAC</i>		
		<u>S1 (France)</u>	<u>S2 (Allemagne)</u>	<u>S3 (Portugal)</u>
Investissement	k€	300 ⁵	300 ⁵	300 ⁵
Économie d'énergie	k€/an	+34	-53 (surcoût)	+122
ROI	an	9	-	2,5
Coût d'abattement du CO ₂ ⁶	€/tCO ₂	-19	+99	-138

⁶ Montant prenant en compte un financement à hauteur de 50% de l'investissement initial de 600 k€.

⁷ Un coût d'abattement du CO₂ négatif correspond à un gain (scénario rentable économiquement).

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

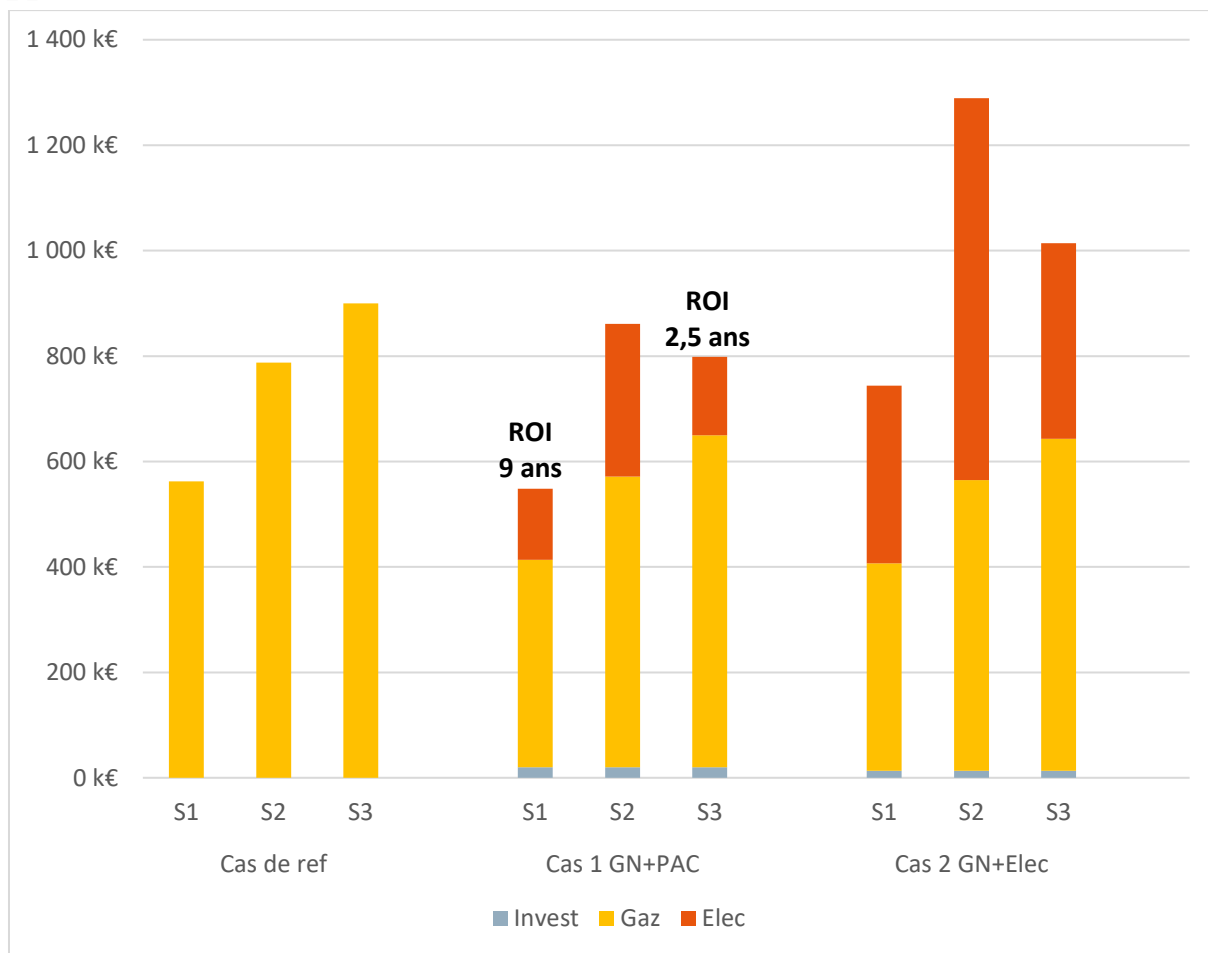


Figure 48 : Graphique des coûts énergétiques annuels pour le cas de référence et les deux solutions d'hybridation pour les 3 scénarios de coût énergétique

On observe dans un premier temps que les coûts d'investissement sont finalement très faibles comparés aux coûts énergétiques annuels. En effet les hypothèses prises supposent un amortissement sur une durée de vie de 15 ans, ce qui représente des coûts entre 14 k€/an et 20 k€/an. Ainsi, l'investissement initial peut sembler élevé (en particulier pour la PAC), surtout en le comparant avec le coût du sécheur en lui-même (souvent aux alentours de quelques centaines de milliers d'euros). Pourtant cette analyse technico-économique nous montre que pour une installation avec un taux de fonctionnement élevé (7 500h/an dans notre cas), les coûts d'investissement deviennent minimes par rapport aux coûts énergétiques induits tout au long de la durée de vie de l'équipement. Cela met en évidence l'importance et l'impact du choix des équipements à la conception du projet.

Concernant l'impact du marché de l'énergie, on remarque que le cas d'hybridation avec PAC est moins sensible aux variations du prix de l'énergie par rapport au cas d'hybridation sans valorisation de la chaleur des buées. En effet, étant donné que l'énergie finale consommée est dans ce cas inférieure de presque 20% au cas 100% électrique, cela permet de réduire dans les mêmes proportions sa dépendance aux fluctuations du marché de l'énergie.

Sur le plan des émissions de GES, le cas d'hybridation avec valorisation de la chaleur fatale est encore une fois plus avantageux. Malgré le poids carbone de la production d'électricité en France très

avantageuse, l'utilisation de la chaleur fatale reste plus intéressante et permet de réduire de presque 5% de plus les émissions avec 100 tonnes de CO₂ équivalents par ans émis de moins.

Le cas d'hybridation avec PAC présente également l'intérêt de nécessiter une puissance électrique plus faible. Bien que dans notre cas, la puissance électrique reste relativement faible, la PAC présente l'avantage de limiter la puissance électrique à 180 kW contre 450 kW nécessaire pour le cas d'hybridation sans valorisation des buées. Pour tout projet d'hybridation électrique, il faut prendre en compte les capacités d'alimentation électrique de l'installation, aussi bien au niveau du site de production que du réseau électrique. Les disponibilités de capacité sont un paramètre qui pourra influencer sur le choix des solutions.

Finalement, d'un point de vue financier, on remarque sur la Figure 48 que la première solution d'hybridation (avec une PAC) est rentable uniquement pour les deux scénarios de prix où le ratio de prix du gaz par rapport à l'électricité est le plus faible (France et Portugal). En revanche, pour la deuxième solution étudiée, il n'y a pas de scénario de prix qui permettent un retour sur investissement. La solution présente dans tous les cas un surcoût, son intérêt réside uniquement dans la réduction des émissions de CO₂ de 20% qu'elle permet d'atteindre.

Pour la 1^{re} solution d'hybridation (avec une PAC), le scénario de prix de l'énergie le plus propice est le n°3 (basé sur le marché portugais avec un prix entre le gaz et l'électricité proche). Il propose un retour sur investissement de moins de 3 ans. Le scénario qui se base sur le marché de l'énergie français présente un TRI plus élevé de 9 ans.

4. Synthèse

4.1. État des lieux

La première phase de l'état des lieux a révélé une documentation limitée sur l'hybridation énergétique des procédés. Cette phase a identifié les principales technologies d'électrification pour remplacer les combustibles fossiles : les résistances électriques, efficaces jusqu'à 1000 °C ; les pompes à chaleur et la compression mécanique de vapeur pour des températures inférieures à 200 °C ; le chauffage par conduction, utilisé notamment dans les fours verriers ; et l'induction, idéale pour la fonte des métaux. Concernant l'hydrogène bas carbone, sa production, son transport et sa distribution posent des défis majeurs de compétitivité, malgré le soutien des politiques publiques. Techniquement, les brûleurs actuels peuvent utiliser un mélange contenant 15 à 25 % d'hydrogène sans modifications majeures, mais des défis tels que la formation de NOx, le stockage et les contraintes de sécurité persistent.

L'étude s'est concentrée sur les procédés thermiques industriels fortement émetteurs de carbone, utilisant des énergies fossiles pour les opérations de chauffage. Les secteurs de la métallurgie, de la chimie et des matériaux ont été privilégiés, car ils représentent la majorité des procédés thermiques utilisant des énergies carbonées difficilement substituables par des énergies bas carbone. En particulier les fours de transformation de la matière, communs à ces secteurs, sont les équipements les plus difficiles à décarboner.

Ces équipements nécessitent des niveaux de température et des puissances élevés, où l'effet convectif de la flamme d'un combustible est crucial pour assurer les cadences de production et l'homogénéité du chauffage des produits. De plus, ces fours sont souvent centraux dans le processus de fabrication, rendant leur modification ou remplacement difficile et coûteux, tant en termes d'investissement que de stratégie opérationnelle.

Des projets majeurs d'hybridation énergétique voient le jour, tels que l'installation d'un électrolyseur de 100 MW sur le site de YARA, permettant de réduire les émissions de CO2 de 15 %. À Dunkerque, un projet prévoit le remplacement d'un haut fourneau par un four électrique à arc utilisant de l'acier recyclé, ainsi que l'ajout d'une nouvelle ligne de production d'acier à partir d'un haut fourneau alimenté à l'hydrogène. Dans l'industrie du verre, les efforts se concentrent sur l'augmentation de la part de l'électricité dans les fours et le développement de brûleurs capables de fonctionner à l'hydrogène.

Des projets plus modestes émergent également, car certains procédés nécessitent une flamme de combustion pour le chauffage. Malgré le coût élevé de l'électrolyseur, il reste abordable à petite échelle et son rendement peut être amélioré par la récupération de chaleur et la valorisation de l'oxygène co-produit, ce qui est particulièrement avantageux pour les industriels utilisant de l'oxygène, notamment via l'oxycombustion.

4.2. Etudes de cas

Les études de cas réalisées dans la deuxième phase de l'étude ont consisté à hybrider les procédés considérés via :

- l'injection d'hydrogène à un taux compatible pour les brûleurs du four de fusion,
- le réchauffage électrique de la zone avant feu du four de briques et tuiles,
- l'électrification par pompe à chaleur du sécheur pour améliorer la récupération de chaleur.

Ces hybridations assurent toutes la pérennité des procédés sans compromettre la qualité des produits finaux, l'hybridation agissant comme un complément énergétique, sans toutefois affecter le mécanisme de transfert de chaleur du procédé existant. Les taux d'hybridation étudiés varient de 6 à 30 %, permettant de réduire les émissions directes de CO₂ de 5 à 27 %, comme illustré dans la Figure 49 ci-après.

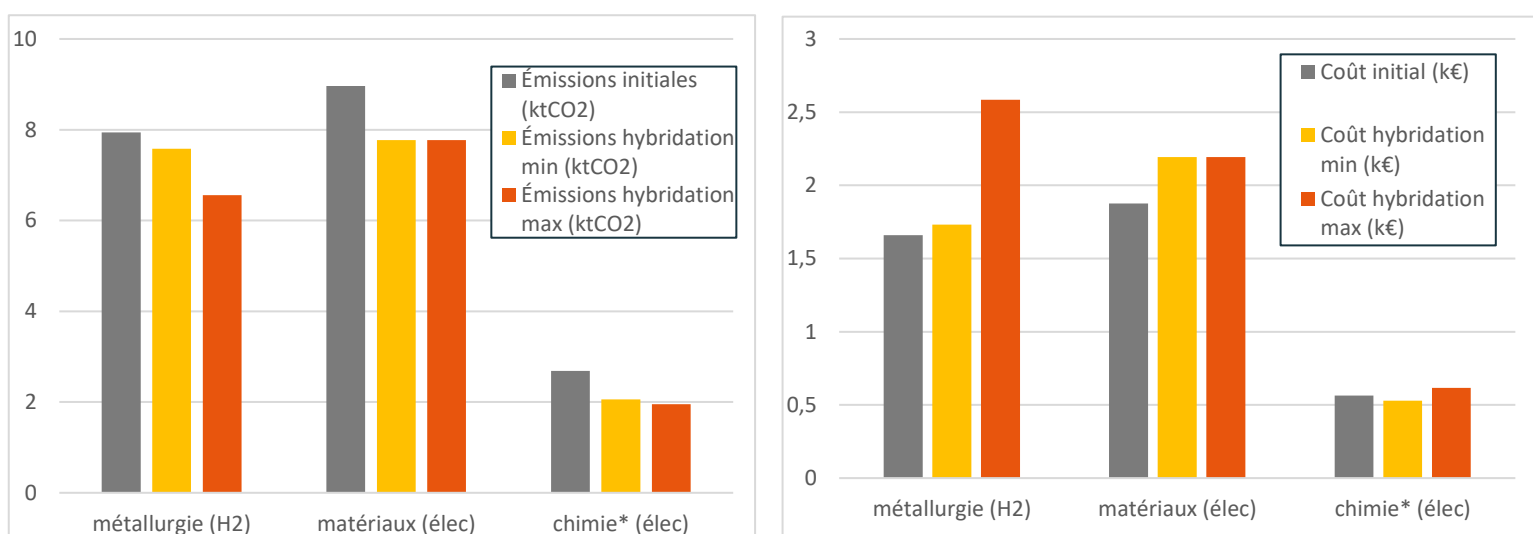


Figure 49 - Émissions et coûts annuels (OPEX + CAPEX annualisé) des études de cas dans le scénario France

**Note : pour le cas chimie, le cas d'hybridation minimum utilise la technologie PAC, et le cas d'hybridation maximum utilise la technologie des résistances électriques (à but comparatif).*

Du point de vue économique, les résultats obtenus sur le périmètre français montrent une augmentation de la facture pour les cas d'hybridation métallurgie et matériaux. Le coût plus élevé de la molécule H₂ bas carbone et de l'électricité implique une hausse de la facture énergétique, ces technologies n'améliorant pas significativement l'efficacité énergétique globale du four. En revanche l'électrification du sécheur via une PAC haute température permet à la fois de décarboner le procédé et de réduire la facture énergétique - le rendement énergétique de la PAC compense largement le coût plus élevé de l'électricité.

Pour le cas du four de fusion métallurgique, le scénario d'utilisation de l'hydrogène lorsque son coût est compétitif permet une faible réduction des émissions de CO₂, mais à moindre coût. C'est le seul scénario envisageable sans surcoût insurmontable, il ne nécessite pas de changement de brûleur mais une automatisation du procédé en fonction des prix de l'énergie. La rentabilité peut être atteinte en considérant une baisse du coût de l'hydrogène bas carbone liée aux effets d'échelle ou des subventions pour sa production, couplée à une augmentation du prix du gaz et notamment de la taxe carbone.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE. Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Dans le cas du four tunnel, l'hybridation par résistances électriques reste limitée et non compétitive. La rentabilité peut être atteinte via un surcoût de type green premium⁸ à la vente des produits, un mécanisme de subvention (par exemple un contrat pour différence carbone) ou bien une augmentation du prix du gaz par rapport à l'électricité.

Concernant le sécheur rotatif, les performances de la PAC associées à la récupération de chaleur permettent au projet d'être rentable (même sans considérer de subventions).

Dans tous les cas étudiés, l'amortissement des investissements CAPEX est très faible au regard des coûts énergétiques sur la durée de vie de 15 ans considérée.

En conclusion, le tableau ci-dessous synthétise les principaux freins et leviers de l'hybridation énergétique directe des procédés industriels, via l'électricité et l'hydrogène. Ajoutons que ces énergies doivent être bas carbone, en considérant à la fois les étapes nécessaires à sa production et son acheminement.

Tableau 16 - Synthèse des freins et leviers de l'hybridation énergétique directe des procédés industriels

Hybridation électrique	
Freins	Leviers
➤ Limitée par la capacité électrique des installations (production, transports, transformateurs...) ➤ Moins adaptée à des besoins ponctuels importants ➤ Technologies de chauffage convectif au-delà de 500°C peu utilisées et encore coûteuses (CAPEX, OPEX)	➤ Amélioration du rendement énergétique (pas de pertes fumées) ➤ Adaptée aux besoins continus (puissance de maintien en température) ➤ Offre une flexibilité et une adaptabilité aux marchés de l'énergie ➤ Bonne opérabilité
Hybridation hydrogène	
Freins	Leviers
➤ Coûts de production élevés, comparés au coût des énergies conventionnelles ➤ Stockage H2 de grande capacité encore peu développé ➤ Questionnements de la part des industriels quant à la durabilité des matériaux des fours exposés à des taux d'H2O élevés ➤ Qualité des produits garantie uniquement avec un taux H2 faible (pour l'instant)	➤ Bien adaptée aux fours industriels THT nécessitant un effet convectif soutenu (four verrier, four terre-cuite, four métallurgique de fusion) ➤ Chauffe rapide ➤ Homogénéité de température ➤ Ne nécessite pas de modifier l'équipement thermique existant ➤ Fours à durée de vie longue (20 à 40 ans), pas de modification de la qualité produit avec un taux H2 faible

⁸ Surcoût acceptable par un client souhaitant bénéficier de produits avec une empreinte carbone réduite.

Les informations présentées dans ce rapport sont CONFIDENTIELLES et sont la propriété d'ALLICE.

Elles ne peuvent être ni communiquées à des tiers ni copiées et/ou utilisées sans l'autorisation écrite préalable d'ALLICE.

Acronymes

AFHYPAC : Association Française pour l'HYdrogène et les Piles A Combustible

CCS : Carbone Captage et Stockage (Carbon Capture and Stockage)

CMV : Compression Mécanique de Vapeur

CSF : Comité Stratégique de Filière

DRI : Direct Reduction Iron (Réduction Directe du Minerai de fer)

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Economiques

PAC : Pompe A Chaleur

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

PIIEC : Projet Important d'Intérêt Européen Commun

SMR : Steam Methan Reforming (technique de vaporeformage de méthane)

SNBC : Stratégie National Bas Carbone

SPOT : Spot Market ou marché au comptant

STEP : Station d'épuration des eaux usées

TURPE : Tarification d'Utilisation du Réseau Public d'Électricité

Bibliographie

- [1] « SNBC-2 synthèse VF.pdf ». Consulté le: 21 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>
- [2] ALLICE, « Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels - analyse technico économique », févr. 2021.
- [3] ALLICE, « Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels - enjeux marchés et réseaux », mars 2022.
- [4] « Consommation d'énergie dans l'industrie – Les entreprises en France | Insee ». Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6666999?sommaire=6667157>
- [5] « Consommation d'énergie dans l'industrie – Les entreprises en France | Insee ». Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6666999?sommaire=6667157>
- [6] ALLICE, « Potentiel d'intégration des gaz décarbonnés en industrie ». 2021.
- [7] B. Millet, A. Monnet, et T. Siragusano, « PREMIERE ANALYSE DU POTENTIEL TECHNIQUE D'ÉLECTRIFICATION DES PROCEDES INDUSTRIELS THERMIQUES PAR DES TECHNOLOGIES MATURES », juin 2020.
- [8] « Statistics | Eurostat ». Consulté le: 28 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_203__custom_11496319/default/map
- [9] « Prospective - Transition(s) 2050 - Synthèse - édition 2024 », La librairie ADEME. Consulté le: 4 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/5071-prospective-transitions-2050-synthese-edition-2024.html>
- [10] « LA FILIÈRE HYDROGÈNE ÉNERGIE EN FRANCE ». Consulté le: 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.sia-partners.com/system/files/document_download/file/2020-12/24a591_d976ed9f674e46c5a2c657ffcf7e3a07.pdf
- [11] « Etude-hydrogene-filieres-avales-2030_AFHYPAC.pdf ». Consulté le: 4 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://hinicio.com/wp-content/uploads/2023/02/Etude-hydrogene-filieres-avales-2030_AFHYPAC.pdf
- [12] « SNH2_VF.pdf ». Consulté le: 4 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNH2_VF.pdf
- [13] J.-P. Yalcin, « 02/02/2023 - Dossier de presse : Accélérer le déploiement de l'hydrogène, clé de voûte de la décarbonation de l'industrie », Presse - Ministère des Finances. Consulté le: 4 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://refonte-bercy.epresspack.online/02022023-dossier-de-presse-accelerer-le-deploiement-de-lhydrogene-cle-de-voute-de-la-decarbonation-de-lindustrie/>
- [14] « Jupiter 1000 - Power-to-Gas - Le Projet », Jupiter1000. Consulté le: 29 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.jupiter1000.eu/projet>
- [15] « decarbonation_feuille_de_route_ciment.pdf ». Consulté le: 28 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files_cni/files/csf/construction/decarbonation_feuille_de_route_ciment.pdf
- [16] « Verre, mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur », La librairie ADEME. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4728-verre-memo-d-analyse-des-enjeux-de-decarbonation-du-secteur.html>
- [17] « Projet Vercane, Fusion du Verre Carbone Neutre », La librairie ADEME. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/6023-projet-vercane-fusion-du-verre-carbone-neutre.html>
- [18] « Fours ». Consulté le: 27 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.geowiki.fr/index.php?title=Fours>
- [19] « Acier, mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur », La librairie ADEME. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4731-acier-memo-d-analyse-des-enjeux-de-decarbonation-du-secteur.html>

- [20] « Concertation ArcelorMittal Décarbonation - Documentation ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.concertation-amf-decarbonation.fr/documentation>
- [21] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, et V. Lemort, « CoolProp 6.6.0 documentation ». Consulté le: 4 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.coolprop.org/>
- [22] « Accueil | global.label.base-empreinte ». Consulté le: 29 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://base-empreinte.ademe.fr/>