

Principaux usages de l'hydrogène

13 mai 2022

Rapport préparé par

PYONNIER

pour le compte du ministère
de l'Énergie et des Ressources naturelles

**Énergie et Ressources
naturelles**

Québec 

Table des matières

1	<u>LISTE DES FIGURES</u>	3
2	<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	3
3	<u>INTRODUCTION</u>	4
4	<u>USAGES CHIMIQUES</u>	5
4.1	HYDROTRAITEMENT	5
4.2	HYDROCRAQUAGE	5
4.3	SYNTHÈSE DU MÉTHANE	6
4.3.1	MÉTHANATION CATALYTIQUE	6
4.3.2	MÉTHANATION BIOLOGIQUE	7
4.4	PRODUCTION D'AMMONIAC	9
4.5	PRODUCTION DE MÉTHANOL	10
4.6	SYNTHÈSE DE KÉROSÈNE ET DIESEL	11
4.7	PRODUCTION D'EAU OXYGÉNÉE	12
4.8	AUTRES UTILISATIONS DE L'HYDROGÈNE DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE	12
4.9	HYDROGÉNATION DES HUILES ET GRAISSES ALIMENTAIRES	13
4.10	TRAITEMENT D'EAUX D'ALIMENTATION DES CHAUDIÈRES	13
4.11	PRODUCTION DE L'ACIER	14
4.12	PRODUCTION D'AUTRES MÉTAUX	17
4.12.1	TUNGSTÈNE	17
4.12.2	MOLYBDÈNE	17
4.12.3	NICKEL	17
4.12.4	RÉDUCTION D'AUTRES MINÉRAIS EN MILIEU HYDROGÈNE	17
4.13	UTILISATION DE L'HYDROGÈNE AVEC LE CO ₂	18
4.13.1	FABRICATION DES PROTÉINES	18
4.13.2	FABRICATION D'HYDROCARBURES ET CARBURANTS	18
5	<u>USAGES ÉNERGÉTIQUES</u>	20
5.1	LES PILES À COMBUSTIBLES	20
5.2	LES TURBINES À GAZ	22
5.3	LES MOTEURS À COMBUSTIONS INTERNES	23
5.4	LES CHAUDIÈRES INDUSTRIELLES À HYDROGÈNE ET LES BRÛLEURS	24
5.5	LES APPLICATIONS DE L'HYDROGÈNE EN MILIEU RÉSIDENTIEL	24
5.5.1	CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL	24
5.5.2	BRÛLEURS DE CUISINIÈRES DOMESTIQUES	24
5.6	PRODUCTION DE HAUTES TEMPÉRATURES POUR DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS	25
5.7	MOBILITÉ	26
6	<u>USAGES PHYSIQUES</u>	27

6.1	PROCÉDÉ DE DÉCOUPAGE PLASMA	27
6.2	PROCÉDÉ DE SOUDAGE	28
6.3	FLUIDE DE REFROIDISSEMENT	28
6.4	PRÉPARATION DE NANOMATÉRIAUX DE CARBONE	29
6.5	FABRICATION DU VERRE	30
6.6	TRAITEMENT THERMIQUE DES PIÈCES MÉTALLIQUES	30
6.7	APPLICATIONS ÉLECTRONIQUES	31
6.8	SYNTHÈSE DE DIAMANT À PARTIR DU GRAPHITE	32
7	USAGES MÉDICAUX ET SCIENTIFIQUES	33
8	RÉSUMÉ	34
9	LIMITES D'UTILISATION DU RAPPORT ET LICENCE D'UTILISATION	35

1 Liste des figures

Figure 1 : Consommation mondiale d'hydrogène par application	4
Figure 2 : Procédé Sabatier pour la méthanation	7
Figure 3 : Procédé biologique pour la méthanation	8
Figure 4 : Procédé Haber Bosch en aval d'une gazéification	9
Figure 5 : Procédé Haber Bosch utilisant l'hydrogène provenant d'électrolyse	10
Figure 6 : Procédé de fabrication du méthanol	11
Figure 7 : Schéma d'un réacteur DRI pour la production d'acier	14
Figure 8 : Procédé MIDREX avec ajout d'hydrogène – Principaux flux.....	15
Figure 9 : MIDREX avec 100 % d'hydrogène – option livraison	16
Figure 10 : MIDREX H ₂ avec 100 % d'hydrogène – option génération intégrée	16
Figure 11 : Équivalence énergétique typique de l'hydrogène	20
Figure 12 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	21
Figure 13 : Procédé de fabrication Verneuil: Croissance par fusion à la flamme	25
Figure 14 : Schéma de principe d'un découpage plasma	27
Figure 15 : Schéma simplifié du dispositif de CVD utilisé pour la production de nanotubes de carbone	29
Figure 16 : Synthèse du diamant à partir du graphite sous un plasma d'hydrogène	32

2 Liste des tableaux

Tableau 1 : Conditions d'opération de l'hydrotraitement.....	5
Tableau 2 : Condition d'opération de l'hydrocraquage.....	5
Tableau 3 : Condition d'opération du procédé Sabatier	6
Tableau 4 : Conditions d'opération d'une hydrogénation d'huile ou graisse végétale	13
Tableau 5 : Réduction dans un four à hydrogène de quelques minerais	18
Tableau 6 : Exemples de turbines à gaz acceptant de l'hydrogène en mélange	23
Tableau 7 : Exemples de moteurs cogénération utilisant de l'hydrogène	23
Tableau 8 : Principaux segments de marché de la mobilité hydrogène.....	26
Tableau 9 : Quelques tests cliniques démontrant l'effet curatif de l'hydrogène sur quelques maladies	33
Tableau 10 : Liste des usages actuels et en développement de l'hydrogène.....	34

3 Introduction

L'hydrogène est une molécule gazeuse, incolore, inodore, inflammable. Cette molécule a une température de fusion et d'ébullition très basse résultant de la faible force d'attraction intermoléculaire. Ses propriétés en font une molécule largement utilisée dans l'industrie depuis fort longtemps, dans des applications variées.

La figure suivante donne le diagramme de Sankey de l'utilisation de l'hydrogène au niveau mondial.

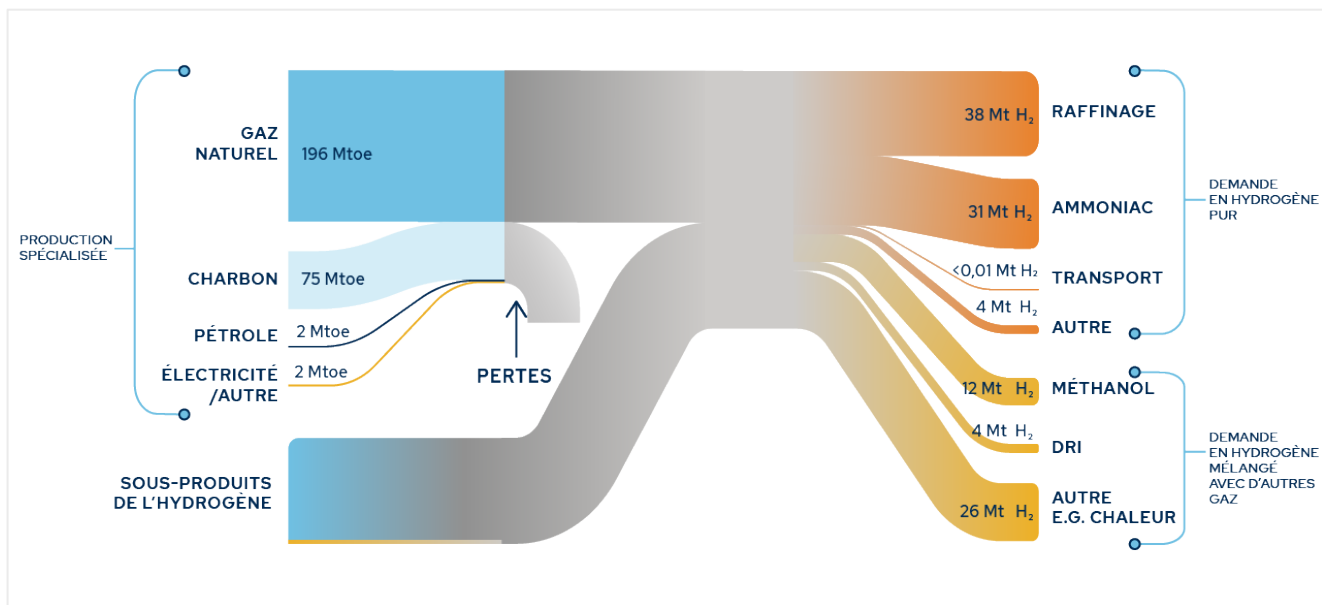


Figure 1 : Consommation mondiale d'hydrogène par application
Mtoe : million de tonnes équivalent pétrole, Mt H₂ : million de tonnes d'hydrogène¹

Sur une consommation totale de 115 Mt/an, 42 Mt (soit 37,5 %) sont utilisées dans des applications industrielles où l'hydrogène est en mélange avec d'autres gaz. Il s'agit pour la plupart de ces applications de valorisation de mélanges de gaz issus de divers procédés industriels. Les 73 Mt restantes (soit 63,5 %) sont utilisées par des applications où l'hydrogène doit être pur. La catégorie « Autre » dans la demande d'hydrogène pur couvre les industries de la chimie, de la métallurgie, de l'électronique et de la verrerie. La catégorie « Autre e.g. chaleur » inclut la production de chaleur à partir des gaz de combustion des aciéries et des gaz dérivés des vapocraqueurs.

Le présent rapport décrit les différentes applications de l'hydrogène en distinguant les usages chimiques, énergétiques, physiques, ainsi que médicaux et scientifiques.

¹ Potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique, Volet C : propositions pour le déploiement de l'hydrogène vert au Québec, Août 2020, Polytechnique Montréal
https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/expertises/Etude_hydrogene_Volet_C.pdf

4 Usages Chimiques

Les principaux procédés impliquant la synthèse de produits en utilisant de l'hydrogène sont examinés ci-dessous.

4.1 Hydrotraitement

Une des plus importantes applications de l'hydrogène, par les quantités consommées, est le traitement du pétrole en raffinerie, environ 50 % de la consommation d'hydrogène pur au total avec l'hydrocraquage. L'hydrotraitement est un des deux traitements de base du pétrole : il sert à retirer des matières telles que le soufre, l'azote ou les métaux nuisibles aux catalyseurs, et à ajuster le produit final.

Cette réaction se déroule dans un réacteur d'hydrotraitement, le courant d'hydrogène est comprimé, puis chauffé et introduit dans le réacteur en même temps que le courant d'alimentation en distillat de pétrole brut provenant de la tour de distillation. Ensuite le produit de la réaction est chauffé et envoyé dans l'unité de distillation, afin d'obtenir du diesel et du Naphta. La réaction se fait en présence d'un catalyseur.

Les conditions d'opération dans le réacteur sont résumées dans le tableau suivant² :

Température d'opération (°C)	Pression d'opération (bar)	Ratio volumique (normaux litre/litre) (H ₂ /hydrocarbure)
250 - 400	5 - 200	~50

Tableau 1 : Conditions d'opération de l'hydrotraitement

4.2 Hydrocraquage

L'hydrocraquage est l'autre traitement de base du pétrole. L'hydrocraquage est un procédé permettant de convertir des distillats lourds de pétrole en coupes légères à haute valeur marchande. Les conditions d'opérations² de ce procédé sont résumées dans le tableau suivant :

Température (°C)	Pression d'hydrogène (bar)	Ratio (m ³ d'hydrogène/ m ³ de charge)
350 – 450	35 – 150	200 - 700

Tableau 2 : Condition d'opération de l'hydrocraquage

Les deux tiers de l'hydrogène fourni en raffinerie pour les réactions d'hydrotraitement et d'hydrocraquage proviennent de l'autoproduction des raffineries (reformage catalytique produisant un gaz contenant l'hydrogène), un tiers provient de fournisseurs extérieurs.

² M.A. Fahim, T.A. Al-Sahhaf, A.S. Elkilani, Fundamentals of Petroleum Refining, Elsevier Science and Technology Books, 2010, Chapitre 7

4.3 Synthèse du méthane

L'hydrogène peut être utilisé pour produire du méthane à partir de CO ou de CO₂.

Plusieurs technologies industrielles matures³, datant des années 1980 ou avant, de méthanation catalytique du charbon et/ou du naphta, c'est-à-dire en faisant réagir soit le charbon et/ou le naphta et l'hydrogène, sont connues depuis longtemps. En pratique les matières premières sont d'abord gazifiées, et les procédés de méthanation se concentrent sur deux options : la méthanation du CO et la méthanation du CO₂.

Dans les dernières années, l'intérêt pour le *Power-to-Gas* et la production d'hydrogène vert, ainsi que les objectifs de décarbonisation de la production d'énergie ont orienté l'intérêt vers la méthanation de CO₂ biogénique avec de l'hydrogène électrolytique. Bien que nouvelle, cette technologie est relativement bien démontrée puisqu'elle s'appuie sur l'expérience issue du charbon et du naphta, et qu'elle a fait l'objet de démonstration spécifique.

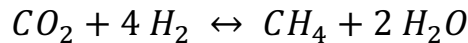
Les réacteurs de méthanation pour le *Power-to-Gas* se divisent en deux catégories :

- les réacteurs catalytiques,
- les réacteurs biologiques.

Les réacteurs biologiques n'ont pas connu la mise en œuvre à grande échelle qu'ont connu les réacteurs catalytiques.

4.3.1 Méthanation catalytique

La méthanation catalytique met en œuvre le procédé Sabatier, procédé de référence pour la fabrication du méthane par réaction du dioxyde de carbone (et aussi du monoxyde de carbone) avec l'hydrogène⁴. La réaction principale de ce procédé est réalisée en phase gazeuse. L'équation chimique de la réaction est la suivante :



Les conditions d'opération de ce procédé sont résumées dans le tableau ci-dessous. La figure suivante schématise le procédé.

Température (°C)	Pression (bar)
300 - 400	10 - 30

Tableau 3 : Condition d'opération du procédé Sabatier

³ Rönsch et al, Review on methanation – From fundamentals to current projects, Fuel 166 (2016) 276–296

⁴ Les Procédés de méthanation de CO - https://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/camicom_restitution_bis.pdf

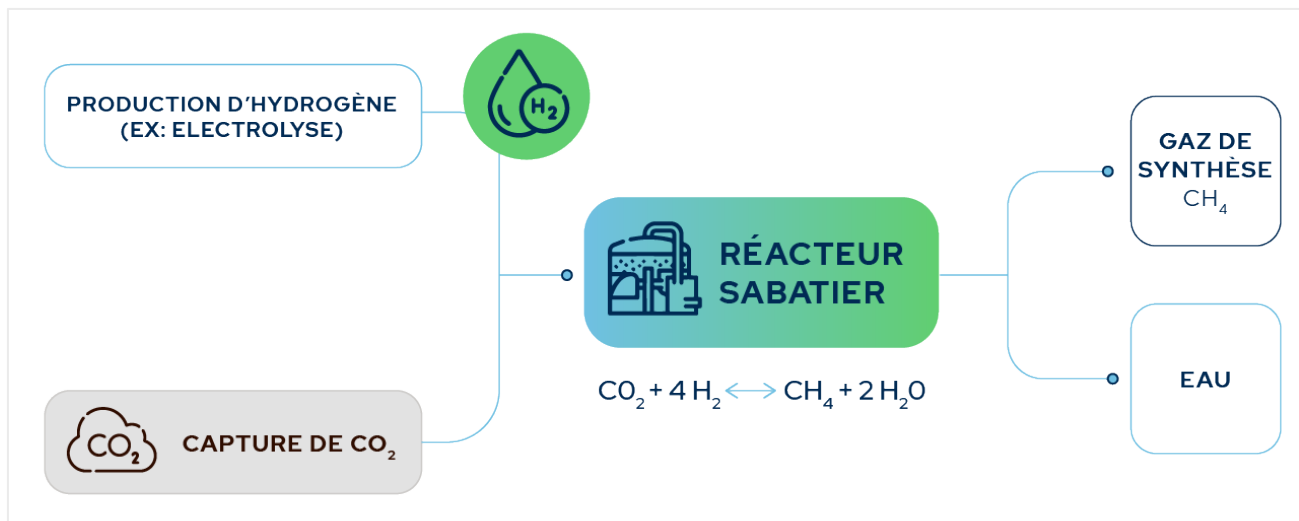


Figure 2 : Procédé Sabatier pour la méthanation

On peut retenir comme proportions que 1,0 kg d'hydrogène et 5,5 kg de dioxyde de carbone, produisent 2,0 kg de méthane et 4,5 kg d'eau. Les densités de l'hydrogène et du dioxyde de carbone étant respectivement 0,09 et 1,9 kg/m³ aux conditions standard (298°K, 1 bar), les volumes d'alimentation d'hydrogène et de dioxyde de carbone sont dans un ratio volumique H₂/CO₂ de ~3,8.

Ce procédé a par exemple été mis en œuvre dans une unité de production du gaz naturel de synthèse à Falkenhagen en Allemagne dans le cadre du projet Européen STORE&GO^{5,6}. Le débit d'hydrogène dans ce pilote est de 210 m³/h et le ratio volumique d'alimentation des réactifs⁵ H₂/CO₂ est de 4. Dans cette installation l'hydrogène est produit par un électrolyseur, le CO₂ liquide est conditionné, puis chauffé avant d'être mélangé à l'hydrogène. Le mélange est envoyé dans l'unité de méthanation constitué d'une série de deux réacteurs, d'un sécheur. Cette installation pilote produit 57 m³/h de méthane de synthèse pur à plus de 96 %, l'hydrogène et le CO₂ représentant moins de 2% chacun des impuretés. Le gaz de synthèse à la sortie de cette unité est injecté dans le réseau de transport par pipeline⁵.

4.3.2 Méthanation biologique

Les conditions opératoires pour la méthanation biologique sont les suivantes⁷ :

- Milieu anaérobie
- Présence d'hydrogène et de dioxyde de carbone dissous en phase aqueuse
- Présence de microorganismes, de type archées méthanogènes
- Température du réacteur comprise entre 40 et 65°C
- Pression du système de l'ordre de 10 bars.

⁵ Ruth Schlautmann et al, Renewable Power-to-Gas: A Technical and Economic Evaluation of Three Demo Sites Within the STORE&GO Project Chem. Ing. Tech.2021,93, No. 4, 568–579, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.202000187>

⁶ https://www.storeandgo.info/fileadmin/dateien/STORE_GO_power_to_gas_roadmap_update.pdf

⁷ Davis Rusmanis, Richard O'Shea, David M. Wall & Jerry D. Murphy (2019) Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency, Bioengineered, 10:1, 604-634, <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>

Les microorganismes produisent du méthane à partir du CO₂ et de l'hydrogène avec des proportions sensiblement identiques à celles de la voie catalytique. Le schéma de procédé, représenté sur la figure suivante, est très similaire à celui de la voie catalytique.

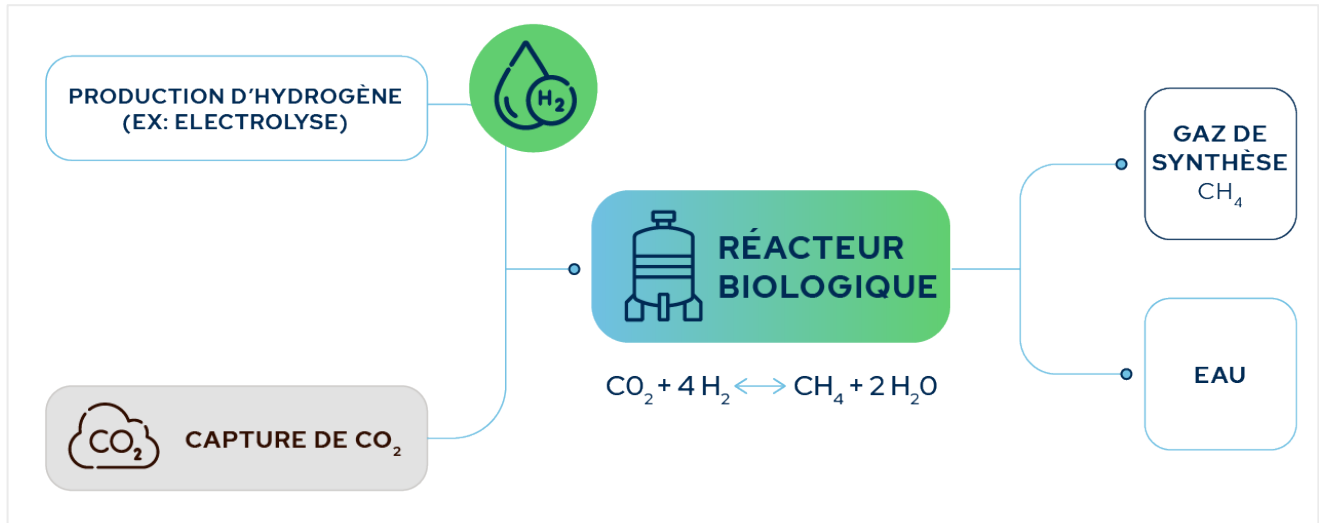


Figure 3 : Procédé biologique pour la méthanation

4.4 Production d’ammoniac

Cet important procédé pour l’agriculture, puisque l’ammoniac est massivement utilisé dans les engrais, représente ~40 % de l’utilisation d’hydrogène au niveau mondial. Au niveau Canadien, la production d’ammoniac est d’environ 5 Mt/an dans un peu plus qu’une dizaine d’usines⁸. Avec un besoin en hydrogène de 0,19 kgH₂/kgNH₃ (légèrement supérieur à la stœchiométrie), cela représente une demande de 1 Mt H₂/an.

Par exemple⁹, les entreprises Iberdrola et Fertiberia envisagent d’alimenter en hydrogène vert leur usine de production d’ammoniac Fertiberia Puertollano (200 000 tonnes par année), en Espagne, à travers un électrolyseur de 100 MW. Le but visé est la fabrication d’engrais verts, à partir de l’ammoniac vert, réduisant ainsi les besoins en gaz naturel de l’usine de plus de 10 %.

L’ammoniac est synthétisé par le procédé Haber-Bosch. Dans ce procédé l’azote et l’hydrogène réagissent dans un rapport de 1:3 à une température optimale entre 350 - 550°C et la pression optimum de 140 – 320 bar¹⁰. La figure suivante présente le schéma de procédé du procédé Haber-Bosch.

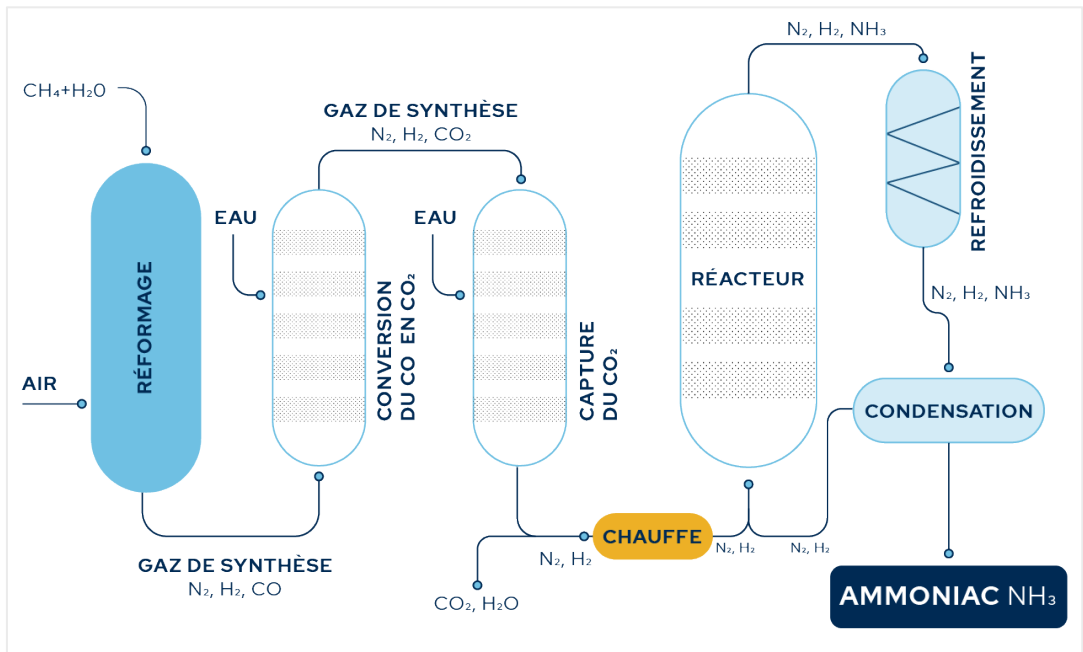


Figure 4 : Procédé Haber Bosch en aval d’une gazéification¹¹

L’ensemble des réactifs gazeux constitue ce qu’on appelle la *pure synthèse*. À son tour, la pure synthèse est obtenue à partir de mélanges gazeux, contenant de l’hydrogène, provenant de gazéification du charbon ou des hydrocarbures. Un condenseur final est nécessaire pour séparer l’ammoniac de l’azote et de l’hydrogène, grâce à la température de liquéfaction plus élevée de l’ammoniac.

⁸ Production d’engrais au Canada, selon le type de produit et la campagne de fertilisation,

<https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210003701>

⁹ Iberdrola and Fertiberia to invest in Spanish green hydrogen | World Fertilizer,

<https://www.worldfertilizer.com/environment/03112020/iberdrola-and-fertiberia-to-invest-in-spanish-green-hydrogen/#:~:text=Fertiberia%20will%20adapt%20its%20plant%20to%20the%20use,large-scale%20experience%20in%20the%20generation%20of%20green%20ammonia>

¹⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9_Haber

¹¹ D’après <https://blog.wika.fr/applications/principaux-types-d-engrais-aperçu-de-leurs-process-chimiques/>

Dans le cas où l’ammoniac est fabriqué à partir de l’hydrogène provenant d’électrolyse, l’étape de gazéification n’est plus nécessaire et le procédé peut se simplifier comme indiqué sur la figure suivante :

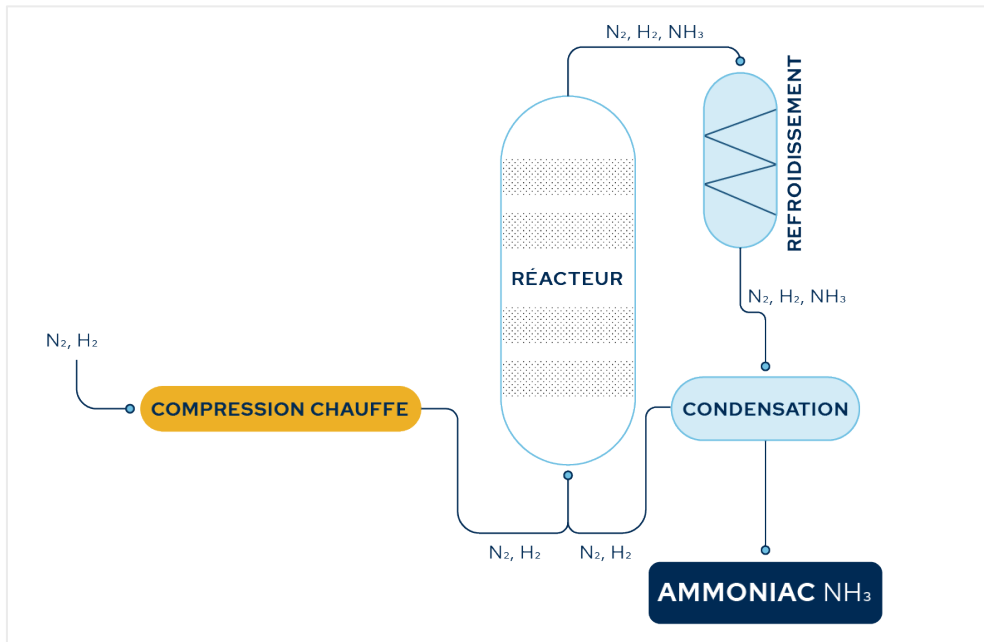


Figure 5 : Procédé Haber Bosch utilisant l’hydrogène provenant d’électrolyse

Le mélange azote/hydrogène doit être comprimé, puis introduit dans le réacteur catalytique. Étant donné que l’azote, l’ammoniac et l’hydrogène se liquéfient à la pression ambiante respectivement à -196, -33 et -253°C, le produit de la réaction, composé d’ammoniac et des réactifs n’ayant pas réagi, est refroidi dans un échangeur à au moins -33°C pour favoriser la séparation de l’ammoniac avec une partie des deux réactifs. L’ammoniac est complètement séparé dans un condenseur, puis les deux réactifs sont recyclés.

Les deux réactifs peuvent aussi être produits séparément, puis mélangés avant l’entrée dans le réacteur de la Figure 5. L’hydrogène peut être produit d’un électrolyseur et l’azote peut être produit par séparation de l’air classique.

4.5 Production de méthanol

Ce procédé représente 11 % de l’utilisation de l’hydrogène dans le monde. L’hydrogène dans cette application est principalement utilisé en mélange au sein d’un gaz de synthèse. La synthèse du méthanol implique l’hydrogénation de monoxyde de carbone comme pour le méthane, mais avec des catalyseurs différents. Le schéma de procédé est décrit dans la figure suivante adaptée de la référence¹² :

¹² https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppBAIS/en/products-and-services/chemical-plants-and-processes/methanol-plants/link-Brosch-re-Methanol_Eng.pdf

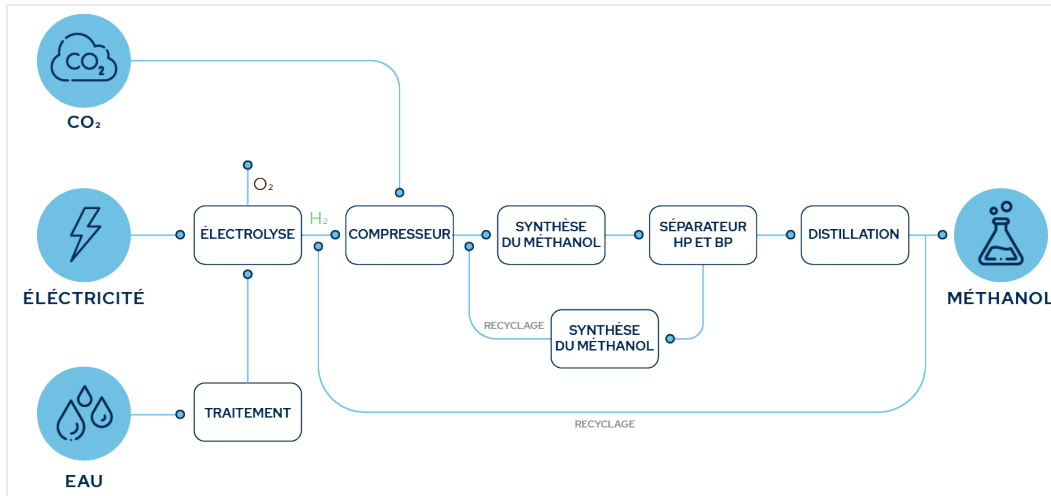


Figure 6 : Procédé de fabrication du méthanol

L'hydrogène est produit par l'électrolyse de l'eau et est compressé en même temps que l'autre réactif, à savoir le dioxyde de carbone. La synthèse du méthanol s'opère dans le réacteur catalytique. Le mélange gazeux compressé est acheminé dans deux séparateurs haute et basse pression, puis dans un distillateur. Le distillateur produit trois flux dont le méthanol, l'eau de procédé et un courant gazeux qui est introduit en aval du compresseur. Dans ce type de procédé, le ratio volumique H₂/CO₂ est de 3/1, la température de réaction se situe usuellement entre 200 et 350°C et la pression entre 30 et 50 bars^{13,14}. Il faut environ 4 MW d'électrolyse pour produire 10 t de méthanol par jour.

Des ensembles proposent des usines de fabrication du méthanol clé en main¹⁵.

4.6 Synthèse de kérosène et Diesel

Avec le procédé Fischer-Tropsch, procédé bien établi, il est possible de produire des mélanges complexes de molécules organiques de synthèse, de façon assez similaire à la synthèse de méthane et de méthanol. Le choix des catalyseurs et des conditions opératoires permet d'orienter la composition des mélanges soit vers des diesels de synthèse, soit vers des kérosènes de synthèse aussi appelé « Synthetic Aviation Fuels » (SAF).

Le réacteur Fischer-Tropsch accepte en entrée un mélange H₂/CO, dans lequel il y idéalement deux fois plus d'hydrogène que de monoxyde de carbone. Il peut être précédé d'un réacteur de conversion du gaz à l'eau inverse (*Reverse Water Gas Shift*) pour produire le CO à partir du CO₂ et ajuster la composition des mélanges dont on dispose.

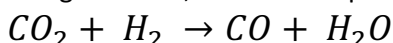
¹³ Hydrogénation du CO₂ en méthanol sur un catalyseur Cu/AlCeO – ScienceDirect
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586118309805>

¹⁴ Hydrogénation du CO₂ en hydrocarbures sur des catalyseurs bifonctionnels CFA-HZSM-5 - ScienceDirect
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631074814001945#bib0010>

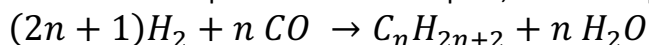
¹⁵ <https://www.swiss-liquid-future.ch/wp-content/uploads/2018/09/2-Total-Thyssenkrupp-SLF-18-July-2018-Methanol-Technologies.pdf>

Dans cette synthèse, les deux réactions mises en œuvre sont :

- La réaction inverse de conversion du gaz à l'eau, endothermique :



- La synthèse de l'hydrocarbure selon le procédé Fischer-Tropsch, exothermique :



4.7 Production d'eau oxygénée

L'eau oxygénée, connue aussi sous le nom technique de peroxyde d'hydrogène, est un liquide incolore utilisé principalement en tant qu'agent de blanchiment de la pâte à papier et des fibres textiles, comme intermédiaire de synthèse et comme désinfectant.

Le peroxyde d'hydrogène est produit aujourd'hui principalement par le procédé d'auto-oxydation d'une alkylanthraquinone. Dans ce procédé, l'oxygène de l'air réagit avec du dihydroxyanthracène, pour donner du peroxyde d'hydrogène et de l'anthraquinone. Alors que le peroxyde d'hydrogène est collecté, l'anthraquinone est réduite par l'hydrogène pour régénérer le dihydroxyanthracène et recommencer le cycle.

4.8 Autres utilisations de l'hydrogène dans l'industrie chimique

La synthèse de nombreux produits chimiques demande de l'hydrogène comme matière première.

Différents réactifs sont combinés à l'hydrogène dans des procédés chimiques de synthèse pour donner les produits recherchés. Nous ne citerons que quelques exemples¹⁶ :

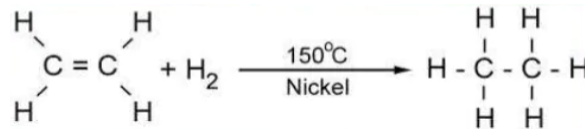
- Les aldéhydes, des acides carboxyliques (acide maléique), des esters (huile, graisse) pour produire respectivement des alcools et plus spécifiquement du butanediol;
- Les composés insaturés pour produire des composés saturés, par exemple, l'hydrogénation peut transformer un alcène en alcane, un alcyne en alcène ou en alcane, un aldéhyde en alcool primaire, une cétone en alcool secondaire et un nitrile en amine primaire, la glycérine en propylène glycol. L'hydrogénation des huiles alimentaires va être examinée plus bas;
- L'air pour produire de l'eau oxygénée;
- Les aromatiques (phénol) pour produire des cycloalcanes (cyclohexanol);
- Les nitrites et nitrates pour produire les amines
- Les précurseurs du polyuréthane, à savoir le MDI (Diphényle méthane diisocyanate) et le TDI (Toluène diisocyanate)¹⁷
- La saturation des BTX (Benzène toluène et xylène)¹⁷.

¹⁶ Voir par exemple : https://www.pangas.ch/fr/processes/process_chemistry_and_refining/hydrogen_applications/index.html

¹⁷ 2016 Ausfelder et al, Hydrogen in the Chemical Industry, chapter 2 of *Hydrogen Science and Engineering Materials Processes Systems and Technology* – Stolten, & Emonts Editors, Wiley, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527674268>

4.9 Hydrogénation des huiles et graisses alimentaires

La réaction d'hydrogénation d'une huile insaturée suit le principe de la réaction suivante dans lesquelles des doubles liaisons à l'intérieur de molécules organiques sont rompues et hydrogénées.



L'hydrogénation modifie les températures de fusion et de solidification des huiles et est généralement employée pour réduire le degré d'insaturation des triacylglycérides naturels¹⁸. La saturation des graisses par hydrogénation s'applique aussi en parfumeries et en cosmétiques.

Le processus d'hydrogénation consiste à disperser dans un réacteur de l'hydrogène dans de l'huile insaturée en présence d'un catalyseur métallique, souvent du nickel. Les conditions d'opérations de l'hydrogénation sont résumées dans le tableau suivant.

Température (°C)	Pression de H ₂ psig (bar)	% Catalyseur (Nickel)	Pureté requise H ₂ (%)
140 - 250	40 – 60 (2,7 – 4)	0,01 – 0,02	> 99,8

Tableau 4 : Conditions d'opération d'une hydrogénation d'huile ou graisse végétale

4.10 Traitement d'eaux d'alimentation des chaudières

L'eau d'alimentation des chaudières et bouilloires industrielles peut avoir une teneur trop élevée en oxygène. L'azote, le dioxyde de carbone et l'hydrogène peuvent être combinés pour réduire la teneur en oxygène de l'eau d'alimentation des chaudières¹⁹.

Nous n'avons pas pu rassembler d'informations sur les besoins en hydrogène dans ce procédé qui semble être peu utilisé.

¹⁸ 2016, Stanković et al, Supported Nickel-Based Catalysts for Partial Hydrogenation of Edible Oils

<https://www.intechopen.com/chapters/53666>

¹⁹ Traitement des eaux d'alimentation de chaudière - Pangas

https://www.pangas.ch/fr/processes/water_and_soil_treatment/kesselspeisewasseraufbereitung/index.html

4.11 Production de l'acier

Environ 10 % de la production mondiale d'acier se fait par réduction directe du fer (DRI) en présence d'hydrogène. Dans ce procédé un premier réacteur produit du minerai de fer préréduit (« sponge iron »), qui est ensuite transformé en acier dans un haut fourneau ou dans un four à arc électrique²⁰. Cet usage de l'hydrogène représente environ 4 Mt/an au niveau mondial comme indiqué sur la Figure 1. Il s'agit essentiellement d'hydrogène en mélange à l'heure actuelle : l'hydrogène est usuellement apporté via un mélange de ce gaz avec du monoxyde de carbone, à partir d'un gaz de synthèse issu de ressources fossiles (charbon, gaz naturel).

Le débit d'alimentation d'hydrogène nécessaire pour le procédé de réduction directe de fer, selon l'AIE, se fait avec 43 kgH₂ par tonne de DRI²¹ (produit intermédiaire), ce qui correspond à environ 50 kg d'hydrogène par tonne d'acier (produit final)^{22,23}. La figure ci-dessous donne une représentation schématique d'un réacteur DRI pour la production d'acier, d'après la référence Tec-Science²⁴.

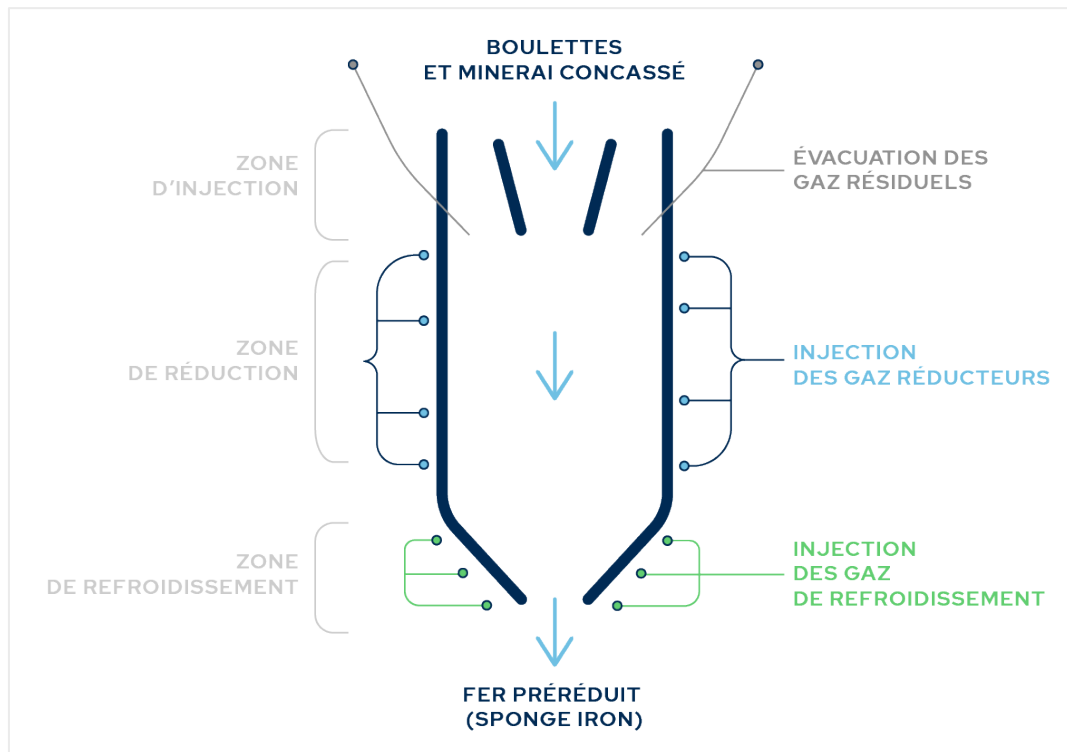


Figure 7 : Schéma d'un réacteur DRI pour la production d'acier

²⁰ Voir par exemple: The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality, Roland Berger, Mai 2020

²¹ Pg 109, The future of Hydrogen – Report, International Energy Agency, June 2019, https://www.hydrogenexpo.com/media/9370/the_future_of_hydrogen_iea.pdf

²² Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking, Valentin Vogl, Max Åhman, Lars J. Nilsson, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618326301>

²³ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI\(2020\)641552_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf)

²⁴ Direct reduced iron process, <https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/direct-reduced-iron-dri-process/>

Les gaz réducteurs sont introduits à mi-hauteur environ du réacteur, à environ 1 000°C. Dans le cas du procédé standard au gaz naturel, la composition typique²⁵ du gaz réducteur est de 55 % H₂ et 36% CO.

Dans cette configuration, il est possible d’augmenter la teneur en hydrogène des gaz réducteur, et de substituer en partie ou totalement le gaz naturel par de l’hydrogène vert.

Ainsi, comme le montre la figure ci-dessous le procédé MIDREX²⁵ par exemple peut accueillir jusqu’à 30 % de substitution par l’hydrogène sans modification de l’équipement. Dans ce cas, 20 000 Nm³/h de gaz naturel peuvent être remplacés par environ 60 000 Nm³/h d’hydrogène dans une usine de 2,0 millions de t/an. La figure ci-dessous illustre le procédé MIDREX avec ajout partiel d’hydrogène généré autrement que par reformage du gaz naturel.

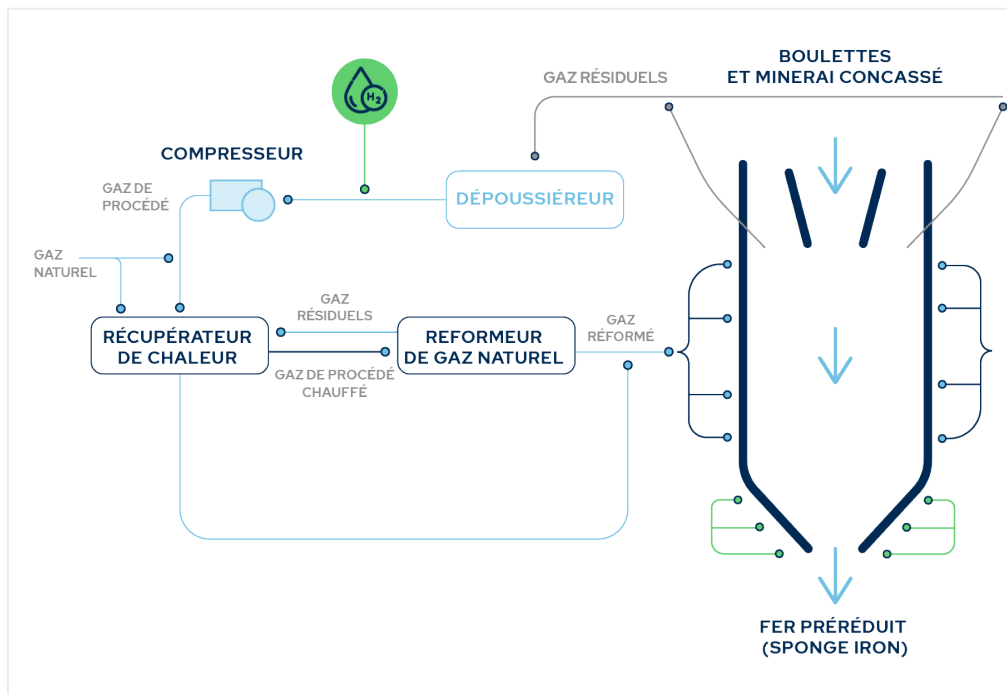


Figure 8 : Procédé MIDREX avec ajout d’hydrogène – Principaux flux

Dans le futur, la stratégie de décarbonisation des sidérurgistes est de faire fonctionner ce procédé avec presque 100 % de substitution du gaz naturel par de l’hydrogène. Dans ce cas l’hydrogène vert est à produire par un autre procédé que le reformage de gaz naturel, comme l’électrolyse par exemple. Cette dernière peut être installée sur site ou hors site. Les deux figures suivantes illustrent les flux de gaz dans ce cas, pour chacune des options livraison du gaz et production sur site.

²⁵ Ultra-Low CO₂ Ironmaking: Transitioning to the Hydrogen Economy - MIDREX Technologies, Inc.
<https://www.midrex.com/tech-article/ultra-low-co2-ironmaking-transitioning-to-the-hydrogen-economy/>

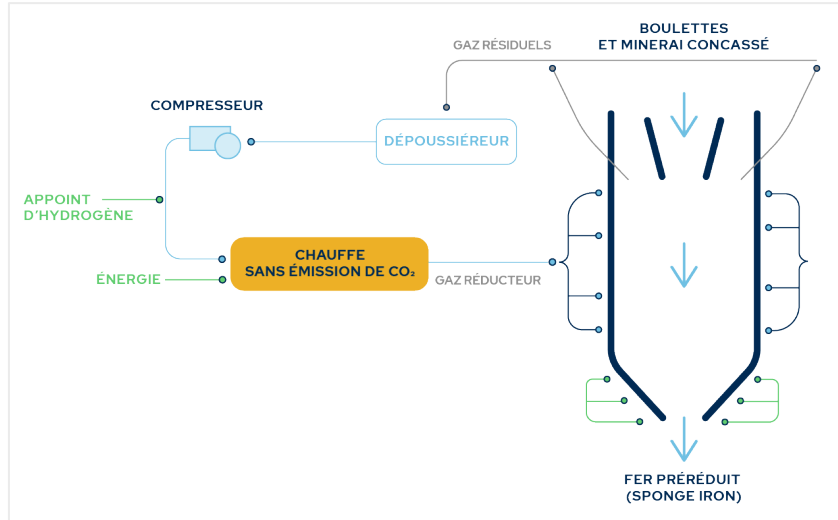


Figure 9 : MIDREX avec 100 % d'hydrogène – option livraison

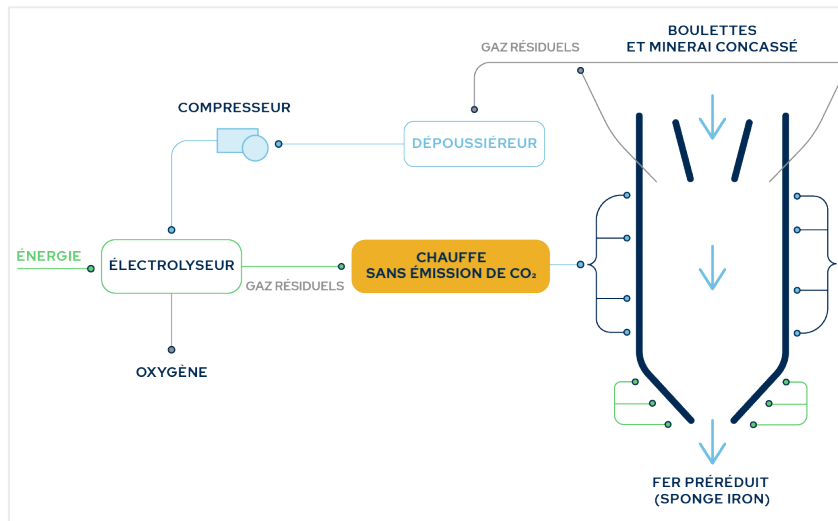


Figure 10 : MIDREX H₂ avec 100 % d'hydrogène – option génération intégrée

Pour ce schéma de traitement, la consommation d'hydrogène est d'environ 550 – 650 Nm³/tDRI pour la réduction elle-même. De plus, lorsque l'énergie est fournie par voie extérieure, jusqu'à 250 Nm³/tDRI d'hydrogène ou une autre source de chaleur respectueuse de l'environnement est nécessaire comme combustible pour le chauffage au gaz de réduction.

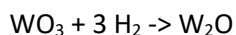
Pour les 90 % de la production d'acier reposant sur le procédé via un haut-fourneau suivi d'une étape d'affinage à l'oxygène (procédé LD Linz-Donawitz), la solution envisagée par les sidérurgistes est de basculer vers la technologie DRI. Par exemple, la co-entreprise Suédoise de SSAB, LKAB et Vattenfall, dénommée Hybrit, a été créée en 2016 dans le but de décarboniser le fer et l'acier en remplaçant le charbon à coke traditionnellement utilisé dans la fabrication de l'acier à partir de minerai de fer par de l'hydrogène, en passant d'un haut fourneau à un réacteur « DRI » (*Shaft reactor*).

4.12 Production d'autres métaux

La réduction d'oxyde de quelques autres métaux que le fer se fait classiquement grâce à l'hydrogène, principalement des métaux rares.

4.12.1 Tungstène

La production de tungstène recourt à un processus industriel consistant à réduire l'oxyde de tungstène dans un four rotatif à une température allant de 600 à 1 100°C²⁶. Au cours de la dernière étape de production, l'oxyde de tungstène chauffé réagit avec l'hydrogène pour former du tungstène et de l'eau, selon la réaction :



Selon le fabricant de tungstène Krohne, l'hydrogène est appliqué à une température de 20°C et une pression de 40 mbar. Le débit d'hydrogène est compris entre 6 et 60 Nm³/h. Le procédé de réduction se déroule dans un four à hydrogène chauffé à 800°C²⁷.

4.12.2 Molybdène

Le molybdène est également réduit par l'hydrogène. La réduction est généralement effectuée dans un four continu chauffé électriquement. La réduction se fait généralement en deux étapes :

- Réduction en MoO₂ (rouge de molybdène) à 600°C
- Réduction du MoO₂ en poudre de molybdène métallique à 1 500°C.

4.12.3 Nickel

Dans plusieurs raffineries hydrométallurgiques de nickel, une solution de sulfate ammoniacal de nickel est réduite en nickel dans un réacteur chauffé à 200°C, sous une pression d'alimentation d'hydrogène de 3 MPa²⁸. Il semble que ce procédé soit une alternative à l'extraction du nickel par électrolyse.

4.12.4 Réduction d'autres minerais en milieu hydrogène

Le tableau²⁶ suivant regroupe la liste des métaux précieux ou rares qui sont produits par réduction dans un four à hydrogène.

²⁶ Luidold, S., Antrekowitsch, H. Hydrogen as a reducing agent: State-of-the-art science and technology. JOM 59, 20–26 (2007), <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0072-x>

²⁷ Mesure du débit d'hydrogène dans la production de tungstène, Groupe KROHNE, <https://krohne.com/fr/applications/mesure-debit-hydrogene-production-tungstene/>

²⁸ Luidold, S., Antrekowitsch, H. Hydrogen as a reducing agent: State-of-the-art science and technology. JOM 59, 20–26 (2007), <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0072-x>

Matériaux/métal	À partir de	Température (°C)
Niobium	Pentachlorure de niobium, NbCl ₅	600 - 650
Osmium	Tétraoxyde d'osmium, OsO ₄	800
Germanium	Dioxyde de germanium, GeO ₂	650
Platine	(NH ₄) ₂ PtCl ₆	800
Palladium	Dichloro-rodiamminepalladium (II), Pd (NH ₃) ₂ Cl ₂	290
Iridium	Ammonium hexa-chloroiridate (IV) (NH ₄) ₂ IrCl ₆	800
Rhénium	Ammonium perrhéate, NH ₄ ReO ₄	350 & 800
Arsenic	AsCl ₃ , As ₂ S ₃ , ou As ₂ O ₃	750
Cobalt	Oxyde de cobalt (II) gris (CoO) Oxyde de cobalt (II, III) noir (Co ₃ O ₄)	< 900

Tableau 5 : Réduction dans un four à hydrogène de quelques minerais

4.13 Utilisation de l'hydrogène avec le CO₂

Face au changement climatique et à la nécessité de réduire la consommation de ressources fossiles, le captage et l'utilisation du carbone (CCUS) est devenue une option des plus importantes pour élargir la gamme des matières premières renouvelables utilisables. Il s'agit d'une des principales sources d'approvisionnement en carbone renouvelable, avec la biomasse et le recyclage.

4.13.1 Fabrication des protéines

Des protéines peuvent être synthétisées à partir de CO₂, d'azote, d'hydrogène et d'eau dans des bio-réacteurs. Il peut s'agir par exemple de produire des protéines pour l'alimentation animale²⁹ ou humaine^{30,31}.

4.13.2 Fabrication d'hydrocarbures et carburants

Il a été vu au paragraphe 4.6 que la mise en œuvre historique du procédé Fischer-Tropsch consistait à produire un gaz de synthèse contenant H₂ et CO à partir de ressources fossiles pour ensuite convertir ce mélange en hydrocarbures. De plus le CO₂ généré dans la production du gaz de synthèse peut être converti en CO par la réaction du gaz à l'eau inverse.

Quand on cherche à valoriser le CO₂, il est donc assez naturel de considérer la conversion de CO₂ par le procédé Fischer-Tropsch. Le CO₂ serait capté en sortie de cheminée, voire dans l'atmosphère. Dans ce cas l'hydrogène doit être apporté indépendamment, puisqu'il ne peut plus provenir de la matière première fossile, par exemple par électrolyse de l'eau. Une fois le gaz de synthèse produit, le procédé Fischer-Tropsch est alors sensiblement le même que celui décrit au paragraphe 4.6. L'innovation réside dans l'origine du CO₂, et l'usage du procédé Fischer-Tropsch dans le cadre de la CCUS est encore au stade de la démonstration.

Notons au passage que des procédés innovants de synthèse du diméthyléther (DME) sont en développement. Le DME est un carburant oxygéné de formule CH₃-O-CH₃. Son indice de cétane élevé, son taux zéro de soufre et sa faible production des particules et des oxydes d'azote en font un carburant plus « propre » que le gasoil.

²⁹ <https://www.kiverdi.com/co2-aquafeed>

³⁰ Solar Foods Readies Hydrogen-to-Protein Pilot | Greentech Media
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-foods-readies-hydrogen-to-protein-pilot>

³¹ <https://avecom.be/feed-and-food/h2bio/>

Dans le cadre du projet européen E2C³², la conversion directe du CO₂ en diméthyle éther (DME), qui passe d'abord par la formation du méthanol, suivi de sa déshydratation, a pu être réalisée en une seule étape par le moyen de catalyseur spécifique, en gardant une stœchiométrie identique à la synthèse du méthanol.

Ce paragraphe a décrit deux types d'applications émergentes de l'hydrogène pour la conversion du CO₂. D'autres types de molécules peuvent être produites à partir de CO₂ et d'hydrogène comme des polymères, des alcools, ou des biofertilisants. Cette liste de produits est appelée à s'étendre au fil des innovations dans ce domaine.

³² <https://www.voltachem.com/e2c>

5 Usages énergétiques

La molécule d'hydrogène est formée de deux atomes d'hydrogène liés par une liaison chimique assez énergétique. De ce fait, l'hydrogène a une densité énergétique (par kg) élevée et est donc un excellent vecteur énergétique, bien que par unité de volume sa densité énergétique soit moins favorable.

L'hydrogène peut donc être combiné avec de l'oxygène de l'air pour libérer l'énergie contenue dans la molécule. Cela peut se faire dans divers équipements : des piles à combustible, des turbines à gaz, des moteurs, des chaudières, etc. pour produire de l'énergie thermique et/ou du travail mécanique et/ou de l'électricité.

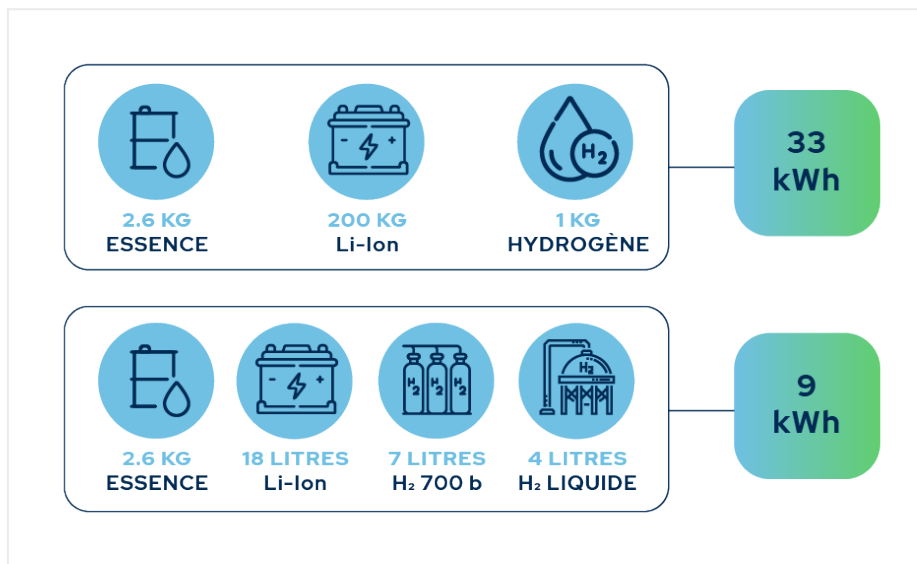
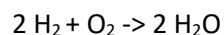


Figure 11 : Équivalence énergétique typique de l'hydrogène

Ce chapitre passe en revue ces différentes options.

5.1 Les piles à combustibles

Les piles sont des systèmes de conversion directe de l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique³³. Par une maîtrise poussée de la réaction chimique, les électrons mis en œuvre dans la réaction d'oxydo-réduction sont canalisés directement vers les charges utiles à alimenter. L'équation de la réaction chimique est la suivante :



La réaction chimique est contrôlée en pratique en injectant l'hydrogène et l'oxygène de part et d'autre d'une membrane. Cette membrane a plusieurs rôles. D'abord, c'est elle qui maintient la séparation entre les gaz. De plus, cette membrane porte en surface des catalyseurs qui vont provoquer la décomposition de l'hydrogène. Enfin, la membrane laisse circuler des charges électrique dans son épaisseur, permettant à l'oxygène de réagir et d'équilibrer la réaction. Sur les deux faces des membranes des électrodes on ajout des électrodes pour

³³ PEM Fuel Cells: Theory and Practic, Frano Barbir, Academic Press, 2e édition 2013

collecter et faire circuler le courant produit. La figure ci-dessous schématise le principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Les membranes sont maintenues en place par des plaques bipolaires qui assurent d'autres fonctions également dans le fonctionnement d'une pile à combustible. En particulier des canaux sont gravés sur ces plaques bipolaires et vont permettre de guider les gaz pour les répartir sur la surface des membranes. En empilant les membranes, en alternance avec des plaques bipolaires on peut accumuler une grande surface de membrane dans un volume réduit et obtenir un dispositif de production d'énergie très compact.

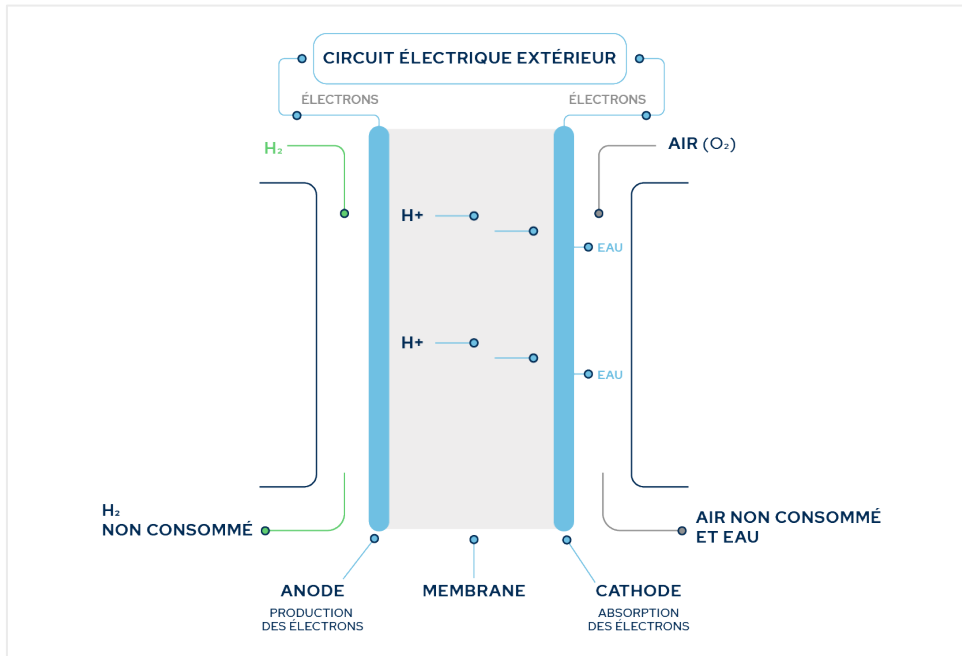


Figure 12 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

L'électricité est produite directement en mode continu dans la pile à combustible, elle est simplement collectée, et envoyée vers son point d'utilisation³⁴. Contrairement à la production d'électricité dans une centrale thermique, il n'y a pas d'étape de chauffe d'un fluide caloporteur puis conversion de cette chaleur en électricité par un alternateur. Ceci permet d'atteindre des rendements électriques élevés qui font tout l'intérêt des piles à combustible. Les rendements sont d'environ 50 %, contre 25 % pour les moteurs à combustion fonctionnant au diesel et 30 % pour les centrales électriques thermiques.

Les piles à combustible disponibles dans le commerce sont généralement livrées comme des systèmes intégrant tous les autres sous-systèmes nécessaires à leur opération, principalement :

- Un système de refroidissement;
- Un conditionneur d'alimentation qui régule le courant continu généré par la pile et convertit ce courant continu en courant alternatif (AC);
- Un système électronique de pilotage;
- Et pour les piles utilisant le gaz naturel ou le biogaz comme combustible, un reformeur, qui convertit le combustible, en un flux d'alimentation riche en hydrogène pour la pile à combustible.

³⁴ Des étapes de conversion en courant alternatif, de réglage de la tension et/ou d'autres caractéristiques peuvent être ajoutés en fonction de l'application.

La pureté requise de l'hydrogène alimentant une pile est très élevée, car les catalyseurs contenus dans les piles sont très sensibles à certains polluants. Elle doit minimalement répondre à la norme SAE TIR J2719/1³⁵. Essentiellement cette norme indique que les concentrations de l'eau, des hydrocarbures totaux, du sulfure, des particules doivent toujours être testées avant alimentation de l'hydrogène dans ce type de pile. Par ailleurs, l'hydrogène provenant d'une cellule d'électrolyse chlore alkali doit subir un contrôle supplémentaire sur la concentration en halogénures total. La même procédure s'applique pour l'hydrogène provenant d'une cellule d'électrolyse alcaline sur la présence d'oxygène.

Les piles à combustible à hydrogène sont silencieuses, sans vibrations et produisent très peu d'émissions, ce qui permet d'envisager leur utilisation pour des usages très divers. Dépendamment des technologies de pile, de la chaleur et du froid peuvent être produits en complément de l'électricité. Il existe différentes tailles de piles à combustibles en fonction des besoins énergétiques :

- À partir de quelques watts, pour des applications portables ou de recharge d'appareils électroniques;
- Quelques dizaine ou centaines de watts pour alimenter des petits dispositifs mobiles comme des moyens de télécommunications;
- Quelques kW, par exemple pour des applications stationnaires sur des sites isolés ou pour assurer le secours électriques d'installations critiques de petite puissance (antennes, etc.), ou alimenter un logement;
- Entre 10 à 100 kW typiquement pour des voitures ou des véhicules utilitaires;
- Des piles de 50 à plusieurs centaines de kW, pour des applications dans des bâtiments industriels et commerciaux, ou pour des véhicules lourds;
- Des piles de grandes tailles, au-delà de 500 kW, voire de plusieurs MW, pour alimenter des procédés industriels, de grands bâtiments ou des quartiers.

5.2 Les turbines à gaz

Plusieurs turbines à gaz de grande puissance, c'est-à-dire plusieurs centaines de MW, et acceptant des mélanges gaz naturel/hydrogène ont été développées par les grands manufacturiers. L'état de l'art actuel semble se situer vers 20-30 % d'hydrogène dans le mélange lors de tests réalisés par les manufacturiers³⁶. Les teneurs acceptables en hydrogène varient en fonction des manufacturiers et des modèles comme le montre le tableau ci-dessous.

³⁵ SAE TIR J2719/1 Application Guideline for Use of Hydrogen Specification (energy.gov)

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f21/fcto_2014_hcd_workshop_5_steele.pdf#:~:text=SAE%20J2719%2C%20E%280%9CHydrogen%20Fuel%20Quality%20for%20Fuel%20Cell,the%20specification%20are%20possible%20at%20any%20given%20site.

³⁶ Hydrogen Gas Turbines Report, The Path Towards a Zero-Carbon Gas Turbine, ETN Global,

<https://www.researchgate.net/profile/Mirko-Bothien/project/Hydrogen-gas-turbine/attachment/5e32a0213843b06506d57800/AS:852973328539650@1580376097516/download/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf?context=ProjectUpdatesLog>, p.12

Manufacturier	Modèle de turbine	Puissance (MW)	Mélanges CH ₄ /H ₂ acceptés
Ansaldo Energia ³⁷	GT 36 - H	370 – 545	Jusqu'à 50 % (volume)
Baker Hughes ³⁸	NovalT-16	< 20	Jusqu'à 100 %
Siemens ³⁹	SGT 700	600 MW	Jusqu'à 60 %
Mitsubishi Hitachi Power Systems ^{40,41}	Non spécifié	700 MW	Jusqu'à 30 % (volume)

Tableau 6 : Exemples de turbines à gaz acceptant de l'hydrogène en mélange

Des turbines à gaz capable de petites capacités pouvant fonctionner en hydrogène, ou spécialement conçues pour utiliser de l'hydrogène, sont également développées par différents équipementiers. On peut citer à titre d'exemple Turbotec⁴², une start-up Belge, qui développe une turbine à gaz à hydrogène pour la cogénération dans la gamme 550 kW_{el} / 950 kW_{th}.

5.3 Les moteurs à combustions internes

Les manufacturiers de moteurs stationnaires pour la cogénération commencent à proposer des modèles permettant d'utiliser de l'hydrogène pur ou en mélange au gaz naturel. Là encore, les teneurs acceptables en hydrogène varient en fonction des manufacturiers et des modèles comme illustré dans le tableau ci-dessous.

Manufacturier	Modèle	Puissance (kW)	Mélanges CH ₄ /H ₂ acceptés
Deutz ⁴³	TCG 7.8 H2	200	100 %
2G Energy	Agenitor SG	115 - 360	Jusqu'à 40 % (modèles standards) Jusqu'à 100 % (modèles dédiés)
Innio ⁴⁴	Jenbacher Type 3 Type 4	Large gamme 650-1050 el / 600-1450 th 500-900 el / 600-1200 th	Jusqu'à 25 % (volume, avec adaptateur) Jusqu'à 60 % (volume, modèles dédiés) Jusqu'à 100 %

Tableau 7 : Exemples de moteurs cogénération utilisant de l'hydrogène

Certains équipementiers proposent des solutions pour adapter des modèles conçus pour le gaz naturel afin qu'ils puissent utiliser jusqu'à 100 % d'hydrogène, par ajout d'un système d'alimentation en hydrogène spécifique et des ajustements du système de pilotage.

³⁷ Hydrogen Gas Turbines Report, The Path Towards a Zero-Carbon Gas Turbine, ETN Global, pg 13

³⁸ Hydrogen Gas Turbines Report, The Path Towards a Zero-Carbon Gas Turbine, ETN Global, pg 14

³⁹ Hydrogen Gas Turbines Report, The Path Towards a Zero-Carbon Gas Turbine, ETN Global, pg 18

⁴⁰ Hydrogen Gas Turbines Report, The Path Towards a Zero-Carbon Gas Turbine, ETN Global, pg 17

⁴¹ Japon : une turbine à gaz alimentée par un mélange d'hydrogène à 30%, Enerzine, 1^{er} février 2018

<https://www.enerzine.com/japon-une-turbine-a-gaz-alimentee-par-un-melange-dhydrogene-a-30/24546-2018-02>

⁴² <https://www.turbotec.be/hydrogen-gas-turbine/>

⁴³ <https://www.deutz.com/en/media/press-releases/deutz-hydrogen-engine-ready-for-the-market>

⁴⁴ <https://www.innio.com/en/solutions/power-generation/hydrogen-fired-power-generation>

5.4 Les chaudières industrielles à hydrogène et les brûleurs

Le marché commence à offrir des chaudières industrielles pour la production de vapeur. Par exemple Bosch communique autour d'une offre à venir de chaudières jusqu'à 5 MW⁴⁵, fonctionnant 100 % à l'hydrogène. Le principe de chauffe est identique aux chaudières usuelles, seul le brûleur est différent.

Des innovations apparaissent dans le monde des chaudières qui pourraient permettre de réduire les écarts de prix entre l'hydrogène et d'autres combustibles. La compagnie Hydrogen Technologies a breveté une technologie, appelée « CleanH2steam Dynamic Combustion Chamber⁴⁶ » pour brûler de l'hydrogène dans une configuration particulière qui permettrait de produire de la chaleur avec un rendement et un coût meilleurs que les technologies de combustion⁴⁷.

Par ailleurs, l'industrie pétrolière a développé des brûleurs d'hydrogène depuis longtemps pour détruire des flux de sous-produits en raffinerie ou dans des usines pétrochimiques. De nombreux équipementiers fournissent des brûleurs dans différentes gammes de puissance.

5.5 Les applications de l'hydrogène en milieu résidentiel

5.5.1 Chauffage résidentiel

Il existe plusieurs applications de brûleurs et de chauffage résidentiels utilisant de l'hydrogène pur ou en mélange. Par exemple, des compagnies européennes comme BDR Therméa⁴⁸, Bekaert⁴⁹, Giacomini⁵⁰, Worcester Bosch⁵¹, et Baxi^{52,53} conçoivent des systèmes de chauffage résidentiels utilisant 100 % ou jusqu'à 100 % d'hydrogène.

Des foyers à hydrogène pour cheminée ont également été démontrés.

5.5.2 Brûleurs de cuisinières domestiques

Les brûleurs des cuisinières domestiques pourraient être alimentés soit par un mélange de gaz naturel et d'hydrogène, soit par de l'hydrogène pur. Au Royaume-Uni, à Gateshead, les deux premières maisons équipées de chaudières et de plaques de cuisson à l'hydrogène ont été construites en avril 2021^{54,55}.

⁴⁵ Industrial Boilers – Hydrogen - Steam · Heat · Power, Bosch,

https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/09/14134817/Decarbonisation-of-Heating-and-process-heat_EN_public.pdf

⁴⁶ https://hydrogentechnologiesinc.com/wp-content/uploads/sites/2/2021/09/HTI-Specification-Brochure-09.24.2021_Final.pdf

<https://hydrogentechnologiesinc.com/-/home>

⁴⁷ https://hydrogentechnologiesinc.com/wp-content/uploads/sites/2/2022/02/Hydrogen-Technologies-Corporate-Presentation_Final-03.2022.pdf

⁴⁸ <https://www.bdrthermeagroup.com/en/products-and-services/products/hydrogen-boilers>

⁴⁹ <https://heating.bekaert.com/en/news>

⁵⁰ <https://www.giacomini.com/en/hydrogen-systems/h2hydrogen-hydrogen-boiler-giacomini>

⁵¹ https://www.worcester-bosch.co.uk/img/documents/hydrogen/The_Future_of_Fuel.pdf

⁵² <https://www.baxiboilers.com/>

⁵³ <https://fuelcellworks.com/news/baxi-and-worcester-bosch-provide-hydrogen-boilers-for-uks-first-100-hydrogen-public-showcase/>

⁵⁴ Exploring the potential for domestic hydrogen appliances, Stephen Livermore, 1er Mai 2018, The engineer,

<https://www.theengineer.co.uk/domestic-hydrogen-appliances/>

⁵⁵ First UK homes with hydrogen boilers and hobs to be built by April, 16 février 2021, The Guardian,

<https://www.theguardian.com/business/2021/feb/16/first-uk-homes-with-hydrogen-boilers-and-hobs-to-be-built-by-april>

Signalons pour être tout à fait complet dans cette catégorie d'usage, la possibilité de convertir des équipements de chauffe et de cuisson pour les bâtiments commerciaux et institutionnels, en particulier la restauration⁵⁶. Il semble que les produits disponibles sur le marché pour ces applications soient encore rares.

5.6 Production de hautes températures pour des procédés industriels

La combustion de l'hydrogène donne accès à des températures très élevées, plus de 2000°C est atteignable. Différents procédés industriels peuvent nécessiter de hautes températures, nous donnons ici l'exemple du procédé Verneuil, pour la fabrication de pierres synthétiques et artificielles.

Le principe de la synthèse est la fusion par une flamme d'un matériau avant de se cristalliser au contact d'une fraction d'un monocristal préalablement obtenu, appelé germe cristallin.⁵⁷ Le ratio volumique H₂/O₂ est un facteur important pour ce procédé. Plusieurs applications de ce procédé se retrouvent en bijouterie, en horlogerie, en médecine, micromécanique et en optique⁵⁸. La figure suivante présente le principe de mise en œuvre du procédé de fabrication Verneuil⁵⁸.

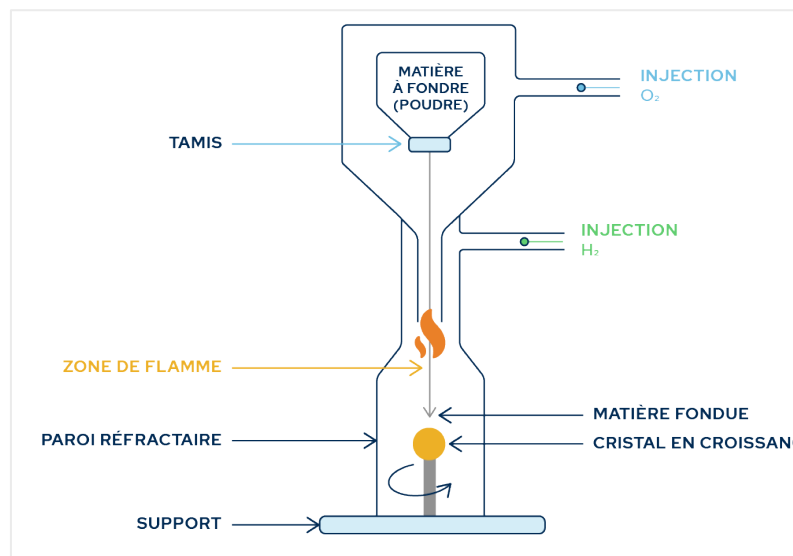


Figure 13 : Procédé de fabrication Verneuil: Croissance par fusion à la flamme

La fabrication du ciment est un autre exemple de procédé énergivore nécessitant de hautes températures. Plusieurs entreprises entreprennent des projets pour intégrer l'hydrogène dans le procédé de fabrication du ciment, notamment comme combustible au niveau du four et comme carburant pour le transport de matières. La mise en œuvre de l'hydrogène se ferait dans ce cas au travers des technologies et dispositifs décrits dans ce rapport.

⁵⁶ <https://www.hy4heat.info/>

⁵⁷ Rencontre d'un fabricant de pierres de synthèse : saphirs et rubis - Galerie Elsa Vanier
<https://www.elsa-vanier.fr/rencontre-dun-fabricant-de-pierres-de-synthese-saphirs-et-rubis/>

⁵⁸ Méthodes de fabrication des pierres synthétiques et artificielles
<https://www.gemmo.eu/fr/procedes-de-fabrication-des-pierres-gemmes-synthetiques-et-artificielles.php>

5.7 Mobilité

La mobilité est un secteur extrêmement important pour l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Ce secteur est bien sûr très dépendant aujourd'hui des produits pétroliers et un important émetteur de gaz à effet de serre. À la différence des applications stationnaires de l'hydrogène établies de longue date, et qui génèrent un marché mondial d'environ 70 Mt H₂/an, la demande totale en hydrogène pour les applications mobilité est encore aujourd'hui minime, elle représente moins de 0,01 Mt dans la consommation d'hydrogène mondiale (voir Figure 1 : Consommation mondiale d'hydrogène par application). Il est anticipé que cette demande connaîtra une croissance très importante dans les décennies à venir pour répondre aux enjeux de décarbonisation des transports.

Deux grandes options sont actuellement considérées pour convertir l'énergie à bord du véhicule : des moteurs à hydrogène ou des piles à combustible. Tous les types de véhicules peuvent faire l'objet d'une motorisation électrique à l'hydrogène. Le tableau suivant résume les principaux segments de marché de la mobilité hydrogène.

Segment de la mobilité hydrogène	Exemples de véhicules
Transport routier	Voitures individuelles Véhicules professionnels Bus de transport collectif Camions
Transport ferroviaire	Locomotives
Transport aérien	Avions Hélicoptères Drones
Transport maritime	Ferries Navires marchands Remorqueurs
Engins lourds	Tracteurs agricoles Engins miniers et de chantier Engins de manutention, dont chariots élévateurs

Tableau 8 : Principaux segments de marché de la mobilité hydrogène

Chaque segment a sa maturité et sa dynamique propre, en particulier en termes de disponibilité commerciales des véhicules neufs avec une motorisation électrique à hydrogène. Il faut par ailleurs garder en tête, la possibilité de convertir des véhicules thermiques, en particulier des véhicules utilitaires urbains ou des camions, en adaptant les systèmes d'injection et les moteurs.

Les consommations typiques des véhicules routiers s'échelonnent entre 1 kgH₂/100 km pour un véhicule individuel, à 5 kgH₂/100 km pour un véhicule de distribution urbaine, et 7-9 kgH₂/100 km pour des camions à semi-remorque à utilisation régionale ou long-courriers. Les bus à hydrogène consomment typiquement 8 kgH₂/ 100 km.

6 Usages Physiques

6.1 Procédé de découpage plasma

Il s'agit d'un procédé où le métal à couper doit être porté à la température de fusion sur toute son épaisseur. La combinaison d'un l'arc électrique et de gaz plasmagène permet de créer un plasma. Le procédé de découpage par le jet plasma est un exemple d'application où l'hydrogène gazeux peut intervenir. L'hydrogène est en général utilisé en mélange avec d'autres gaz.

Quelques exemples :

- Un mélange gazeux argon/hydrogène en proportion volumique 80/20 comme gaz plasmagène peut être utilisé pour couper les aciers alliés au chrome et nickel⁵⁹.
- La coupe d'acier inoxydable et d'aluminium épais (plus que ½ po), utilise un mélange généralement de 35 % d'hydrogène et 65 % d'argon (mélange H35)⁶⁰.
- L'argon-Hydrogène est aussi utilisé dans les torches à injection d'eau jusqu'à 1000 A pour la coupe d'acier inoxydable jusqu'à 6 po⁶⁰.

La figure ci-dessous illustre la découpe par plasma, adapté de⁶¹.

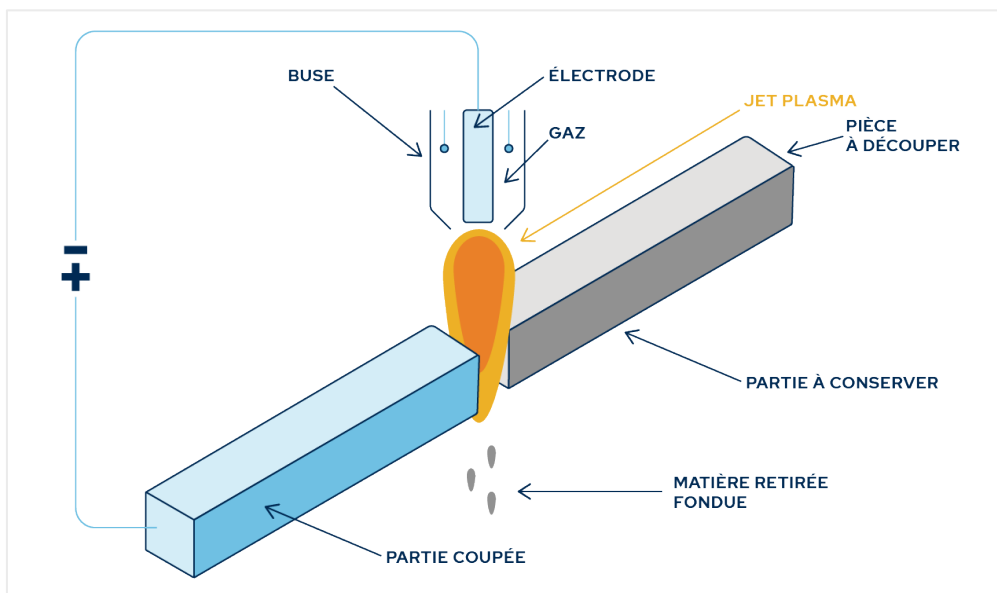


Figure 14 : Schéma de principe d'un découpage plasma

⁵⁹ Brochure « Choisir le bon gaz pour souder, couper et protéger », pg.31

https://www.pangas.ch/fr/images/pangas-brochure-choisir-le-bon-gaz-f_tcm557-114535.pdf

⁶⁰ Guide illustré de la sélection du gaz plasma

<https://www.hypertherm.com/fr/learn/articles/guide-to-plasma-gas-selection/>

⁶¹ La découpe CNC plasma, <https://www.makerslide-machines.xyz/fr/2019/05/01/la-decoupe-cnc-plasma/>

On retrouve des machines de découpe au plasma dans tous les secteurs industriels qui utilisent l'acier de construction, l'acier inoxydable et l'aluminium, avec des plages d'épaisseur moyennes, et pour lesquels le rapport coût / vitesse de coupe a de l'importance comme :

- Construction
- Énergie
- Génie mécanique
- Sidérurgie
- Construction de ventilations
- Travail du métal
- Construction de véhicules

Les volumes de gaz consommés dépendent de l'activité des ateliers de découpes plasma. Souvent cela commence avec de petites quantités, les mélanges sont déjà faits et livrés en format conditionné. Lorsque les volumes augmentent, les mélanges peuvent être faits sur place, toujours à partir de bouteilles de gaz, ou bien à partir de vrac pour les volumes les plus importants.

6.2 Procédé de soudage

Plusieurs procédés de soudage existent tel que MIG, MAG ou TIG. Le MIG, pour soudage à l'arc en atmosphère inerte, utilise des gaz de protection inertes, donc non réactifs, comme l'argon, l'hélium ou des mélanges des deux. Le soudage MAG, pour soudage à l'arc en atmosphère active, utilise un gaz porteur, l'argon, complété par des gaz de protection⁶². Le soudage TIG, pour méthode de soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire, emploie un gaz inerte, un gaz plasmagène, et une électrode non fusible comme le tungstène⁶³. L'hydrogène est le plus souvent employé comme gaz de protection du métal fondu, assurant une résistance optimale de la pièce à la corrosion grâce à ses propriétés réductrices.

Différentes compositions de gaz de protection de soudure sont utilisées, avec un pourcentage d'hydrogène généralement compris entre 0,7 et 25 %⁶⁴.

6.3 Fluide de refroidissement

Étant donné que les propriétés supraconductrices des matériaux apparaissent à des températures plus basses que leur température critique, parfois plus basse que la température de liquéfaction de l'azote liquide, soit 77°K, l'hydrogène apparaît comme un bon réfrigérant pour ces supraconducteurs, avec une température d'ébullition de 20°K. L'hydrogène liquide est donc utilisé pour la réfrigération très basse température de supraconducteurs, dans les laboratoires scientifiques par exemple. L'hélium est utilisé aussi dans ces applications, mais son coût augmentant, cela ouvre des opportunités pour l'hydrogène.

Par ailleurs, la conductivité thermique de l'hydrogène est nettement supérieure à celle des autres gaz. De plus, il possède une capacité thermique spécifique élevée, une faible densité et donc une faible viscosité, ce qui lui permet d'être utilisé comme fluide de refroidissement gazeux à haute performance. L'hydrogène est ainsi

⁶² En quoi consiste le soudage MIG/MAG ? <https://blog.perfectwelding.fronius.com/fr/en-quoi-consiste-le-soudage-mig-mag/>

⁶³ Soudage TIG — https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG

⁶⁴ Choisir le bon gaz. Pour souder, couper et protéger, p.38
https://www.pangas.ch/fr/images/pangas-brochure-choisir-le-bon-gaz-f_tcm557-114535.pdf

couramment utilisé dans les centrales électriques comme liquide de refroidissement dans les turbogénérateurs⁶⁵.

Pour mémoire, l'hydrogène liquide sert également à refroidir les moteurs de fusées⁶⁵.

6.4 Préparation de nanomatériaux de carbone

Il existe plusieurs nanomatériaux de carbone dont la synthèse demande l'utilisation d'hydrogène, parmi lesquels les nanotubes de carbones et le graphène. Leur usage est en croissance.

Les nanotubes de carbone se synthétisent par la technique du dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Cette technique consiste à introduire dans un réacteur et sous forme de vapeur une source carbonée (éthylène, acétylène, toluène...) mélangé à un gaz porteur (hydrogène, argon). La méthode est facilement exploitable en industrie. Elle nécessite seulement un réacteur tubulaire équipé de contrôleur de débit et d'un four comme l'indique la figure ci-dessous adaptée de⁶⁶.

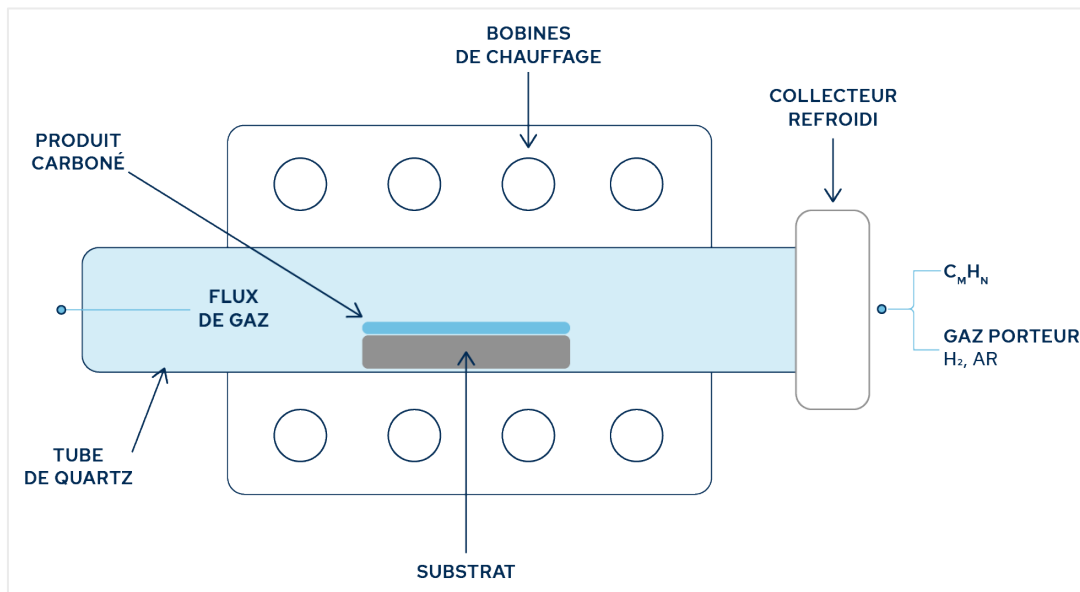


Figure 15 : Schéma simplifié du dispositif de CVD utilisé pour la production de nanotubes de carbone

Par ailleurs, le graphène peut être synthétisé aussi par la méthode de dépôt chimiques en phase vapeur (CVD). Le principe est analogue à celui de la formation des nanotubes, à la seule différence que les catalyseurs sont différents et les températures sont plus élevées dans le cas du graphène. Un courant gazeux H_2/CH_4 dans les proportions de débit 300/6⁶⁷.

⁶⁵ Le fluide caloporteur opposé à l'huile de lubrification– Wattco, <https://www.wattco.com/fr/fluide-caloporteur/>

⁶⁶ Pierre Camille Lacaze, Jean-Christophe Lacroix, Nanotechnologies et nanomatériaux pour l'énergie, ISTE Editions, 2021, pg 28

⁶⁷ Pierre Camille Lacaze, Jean-Christophe Lacroix, Nanotechnologies et nanomatériaux pour l'énergie, ISTE Editions, 2021, pg 50 et 51

6.5 Fabrication du verre

Des mélanges gazeux d'hydrogène et d'azote sont utilisés dans la production de verre flotté. Dans ce procédé, le verre fondu est versé sur la surface d'un bain d'étain fondu. Cette étape va permettre de produire un verre plat de haute qualité. Pour cela, il faut empêcher l'oxydation de l'étain qui pourrait introduire des défauts dans la structure de ce dernier, ce qui pourrait en cascade créer des défauts à la surface du verre.

Afin d'empêcher cette oxydation, cette étape est réalisée sous une atmosphère protectrice contrôlée. Elle se compose généralement d'azote et d'hydrogène dans un ratio 9/1. L'hydrogène réagit avec l'oxygène présent et protège l'étain.

6.6 Traitement thermique des pièces métalliques

Pour donner à des pièces mécaniques en acier, aluminium ou autres alliages des propriétés supérieures, l'industrie métallurgique a fréquemment recours aux traitements thermiques. Ces traitements consistent à chauffer une pièce sous une atmosphère ou des conditions particulières pour venir modifier les propriétés de surface du métal.

Le recuit, la nitruration, la carburation, la cémentation sont les principales opérations mettant en œuvre de l'hydrogène.

Du point de vue chimique, l'hydrogène assure lors des opérations de recuit le caractère réducteur de l'atmosphère, pour empêcher la formation d'oxydes à la surface de l'acier, pour obtenir une bonne propriété de surface (éliminations des résidus d'huiles en particulier) et un aspect de surface métallique brillant.

Du point de vue physique, l'hydrogène favorise, grâce à un coefficient de conductivité thermique élevé, l'échange de chaleur entre le gaz et la surface et améliore le transfert thermique entre la charge et la paroi du four. De plus, grâce à la faible viscosité de l'hydrogène, l'utilisation d'une atmosphère fortement hydrogénée permet d'accroître considérablement la circulation des gaz, par une augmentation de la vitesse de rotation de la turbine, dans le four tout en diminuant la puissance électrique absorbée par les ventilateurs.

Le caractère réducteur de l'hydrogène est sensible dès les premiers pour-cent d'hydrogène dans de l'azote. Industriellement, on rencontre essentiellement quatre types d'atmosphères à base d'hydrogène.

La teneur d'hydrogène est souvent limitée à 5 % pour éviter les explosions⁶⁸. La teneur en hydrogène dans un four de recuit est souvent pilotée en fonction des conditions d'opérations réelles et des besoins spécifiques recherchés⁶⁹.

La technologie des fours pour réaliser ces traitements thermiques et pouvant fonctionner à haute température avec de l'hydrogène est bien établie⁷⁰.

⁶⁸ Les gaz utilisés en traitements sous atmosphère

<https://www.a3ts.org/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/gaz-utilises-traitements-sous-atmosphere/>

⁶⁹ Feu vert pour vos processus. Traitement thermique au plus haut niveau, p.16

https://www.pangas.ch/fr/images/pangas-brochure-traitement-thermique-f_tcm557-168869.pdf

⁷⁰ Brochure Technique des Processus Thermiques, Nabertherm, p.18

https://www.nabertherm.com/sites/default/files/2021-06/thermalprocesstechnology2_french_0.pdf

6.7 Applications électroniques

Les procédés de fabrication de semi-conducteurs utilisent des gaz actifs et un flux de gaz porteur contenant de l'hydrogène de haute pureté pour produire des dispositifs semi-conducteurs. L'hydrogène est donc utilisé pour apporter différentes fonctions dans ces procédés.

Les capacités de l'hydrogène sont importantes pour de nombreuses étapes de la fabrication des semi-conducteurs⁷¹ :

- le recuit,
- le frittage,
- l'implantation ionique,
- l'épitanie des semi-conducteurs,
- le dépôt de films minces incorporant de l'hydrogène,
- la stabilisation pour prolonger la durée de vie des composants par ajout d'hydrogène,
- la gravure au plasma, avec des plasmas contenant de l'hydrogène,
- la passivation des surfaces,
- le conditionnement des semi-conducteurs, et d'autres opérations diverses.

Comparé à l'azote, à l'argon, à l'hélium ou à un autre gaz inerte, l'hydrogène offre une meilleure combinaison de propriétés d'élimination de l'oxygène, une densité extrêmement faible, des propriétés de transfert thermique supérieures et un prix relativement bas par rapport à un gaz rare ou à l'hélium. Les semi-conducteurs imposent les exigences de pureté les plus rigoureuses de toutes les principales applications de l'hydrogène.

Les procédés de fabrication de semi-conducteurs ont commencé à consommer plusieurs mètres cubes normaux d'hydrogène par plaquette traitée. Certaines sources indiquent que les principaux sites de fabrication de semi-conducteurs utilisent désormais des centaines de Nm³ d'hydrogène par heure. Cette augmentation de la consommation d'hydrogène par surface de semi-conducteur produite devrait se poursuivre avec l'évolution des procédés de fabrication. Les volumes croissants de semi-conducteurs tirent également la demande d'hydrogène vers le haut. Cependant, la fabrication électronique consomme encore moins de 1 % de la production mondiale d'hydrogène, soit moins de 700 000 t/an.

⁷¹ JC Cigal, Expanding Use of Hydrogen in the Electronics Industry, Gasworld - Specialty Gas Report • Fourth Quarter 2016
https://www.linde-gas.com/en/images/Expanding%20Use%20of%20Hydrogen%20in%20the%20Electronics%20Industry%20Gasworld%20November%202016_tcm17-419014.pdf
2017-03 Silicon Semiconductor issue 1 2017, www.siliconsemiconductor.net, Linde - Hydrogen in Electronics Silicon Semiconductors

6.8 Synthèse de diamant à partir du graphite

Une application similaire à celle de la micro-électronique est la synthèse de diamants utilisés dans l'industrie du polissage et des abrasifs⁷². Des micro-poudres de diamant peuvent être synthétisées par dépôt chimique en phase vapeur par gravure d'un substrat de graphite dans un plasma micro-onde d'hydrogène. Le gaz utilisé est un mélange méthane-hydrogène. La figure suivante, adaptée de⁷², illustre ce procédé.

Ce procédé semble ne pas être totalement établi encore mais en cours de développement.

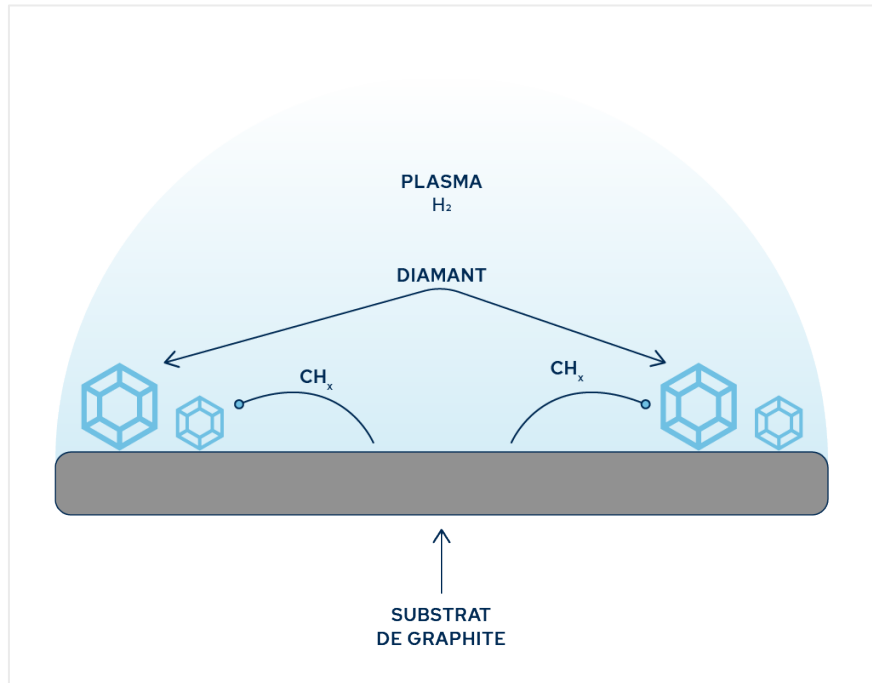


Figure 16 : Synthèse du diamant à partir du graphite sous un plasma d'hydrogène

⁷² Procédé de synthèse de diamant à partir du Graphite » Magazine Science
<https://www.magazinescience.com/technologies/procédé-de-synthèse-de-diamant-a-partir-graphite/>

7 Usages médicaux et scientifiques

L'hydrogène est utilisé depuis longtemps dans le milieu médical et scientifique comme gaz d'étalonnage, pour le calibrage des instruments de contrôle ou d'analyse, ainsi que pour alimenter certains équipements ou dispositifs expérimentaux. Par exemple, les applications de croissance de cultures requièrent des atmosphères contrôlées d'incubateurs aérobies ou anaérobies pour la culture de cellules biologiques ou la croissance de tissus. Les conditions anaérobies sont souvent créées à l'aide de mélanges riches en hydrogène ou en dioxyde de carbone. Nous ne rentrerons pas dans le détail de la diversité de ces usages qui représentent des quantités faibles d'hydrogène au regard des usages détaillés précédemment.

Depuis environ une dizaine d'année l'utilisation de l'hydrogène comme molécule pour le traitement de certaines pathologies a été développée. L'hydrogène est alors considéré comme une molécule thérapeutique et son usage est soumis à des autorisations spécifiques. Il semble qu'il soit aussi parfois utilisé pour la stérilisation, l'usage du peroxyde d'hydrogène étant toutefois très répandu.

En effet, des recherches fondamentales et cliniques ont révélé que l'hydrogène est un important facteur de régulation physiologique ayant des effets protecteurs antioxydants, anti-inflammatoires et anti-apoptotiques sur les cellules et les organes, avec des propriétés permettant d'atténuer diverses maladies. L'hydrogène thérapeutique a été appliqué par différentes méthodes d'administration, notamment l'inhalation directe, la consommation d'hydrogène dissous dans l'eau et l'injection d'une solution saline saturée en hydrogène.

Le tableau suivant résume quelques études cliniques et expériences renseignant sur les teneurs d'hydrogène requis pour traiter certaines maladies avec plus d'efficacité.

Maladie traitée plus efficacement	Quantité d'hydrogène (% gazeux ou en ppm dissous)	Étude
Troubles cérébraux et neurologiques	3 % H ₂	Ono, H. et al. ⁷³
Asthme et obstruction pulmonaire	2,4 % H ₂	Wang, S.T. et al. ⁷⁴
Sténose trachéale	67 % H ₂ , 33 % O ₂	Zhou, Z.Q. et al. ⁷⁵
La dyspnée, la toux, la détresse thoracique, la douleur thoracique	67 % H ₂ , 33 % O ₂	Gwan, W.J et al. ⁷⁶
Diabète de type 2	1,2 ppm H ₂ dissous dans l'eau	Kajiyama, S. et al. ⁷⁷

Tableau 9 : Quelques tests cliniques démontrant l'effet curatif de l'hydrogène sur quelques maladies

L'utilisation clinique de l'hydrogène doit faire l'objet de recherches supplémentaires. La plupart d'entre elles ont été réalisées jusqu'à présent chez l'animal, certains médecins prônent maintenant de concentrer la recherche sur l'utilisation chez les patients atteints de pathologies aiguës et chroniques. L'utilisation de l'hydrogène est considérée de plus en plus prometteuse pour les applications médicales en raison de sa grande efficacité. Les consommations d'hydrogène que cette application représente restent cependant marginales.

⁷³ Ono, H. et al. Hydrogen gas inhalation treatment in acute cerebral infarction: A randomized controlled clinical study on safety and neuroprotection. *J. Stroke Cerebrovasc.* 2017, 26, 2587–2594

⁷⁴ Wang, S.T. et al, Hydrogen gas (XEN) inhalation ameliorates airway inflammation in asthma and COPD patients. *QJM Int. J. Med.* 2020, 164

⁷⁵ Zhou, Z.Q. et al, Breathing hydrogen-oxygen mixture decreases inspiratory effort in patients with tracheal stenosis. *Respiration* 2019, 97, 42–51

⁷⁶ Guan, W.J. et al, N.S. Hydrogen/oxygen mixed gas inhalation improves disease severity and dyspnea in patients with Coronavirus disease 2019 in a recent multicenter, open-label clinical trial. *J. Thorac. Dis.* 2020, 12, 3448–3452

⁷⁷ Kajiyama, S. et al. Supplementation of hydrogen-rich water improves lipid and glucose metabolism in patients with type 2 diabetes or impaired glucose tolerance. *Nutr. Res.* 2008, 28, 137–143

8 Résumé

Le présent rapport a recensé les applications de l'hydrogène, selon quatre familles d'usages : chimiques, énergétiques, physiques, ainsi que médicaux et scientifiques.

Type d'usage	Applications
Usages chimiques	Hydrotraitement Hydrocraquage Synthèse du méthane Production d'ammoniac Production de méthanol Synthèse de kérosène et diesel Production d'eau oxygénée Autres utilisations de l'hydrogène dans l'industrie chimique Hydrogénation des huiles et graisses alimentaires Traitement d'eaux d'alimentation des chaudières Production de l'acier Production d'autres métaux Utilisation de l'hydrogène avec le CO ₂ Fabrication des protéines Fabrication d'hydrocarbures et carburants
Usages énergétiques	Piles à combustibles Production de hautes températures pour des procédés industriels Turbines à gaz Moteurs à combustions internes Chaudières industrielles à hydrogène et les brûleurs Applications de l'hydrogène en milieu résidentiel Chauffage résidentiel Brûleurs de cuisinières domestiques Production de hautes températures pour des procédés industriels Mobilité
Usages physiques	Procédé de découpage plasma Procédé de soudage Liquide de refroidissement Préparation de nanomatériaux de carbone Fabrication du verre Traitement thermique des pièces métalliques Applications électroniques Procédé de synthèse du diamant à partir du graphite
Usages médicaux & scientifiques	Inhalation Ingestion d'eau enrichie en hydrogène Laboratoire et R&D, analyses

Tableau 10 : Liste des usages actuels et en développement de l'hydrogène

9 Limites d'utilisation du rapport et licence d'utilisation

L'interprétation du contenu de la présente publication (ci-après « **Publication** ») ne saurait engager la responsabilité de son auteur, de Pyonnier, ses directeurs, employés et agents (ci-après collectivement « **Pyonnier** »);

Le contenu de la Publication ne saurait constituer un examen exhaustif. Pour plus de précisions, Pyonnier s'est appuyée sur la présentation fidèle des informations, données ou représentations obtenues de sources publiques. Pyonnier n'a effectué aucun audit ou examen, ni demandé une vérification externe des informations qui ont été extraites de sources publiques. Pyonnier n'accepte aucune responsabilité pour toute perte occasionnée par une partie prenante en raison de la confiance dans les informations qui nous ont été trouvées dans le domaine public.

La Publication est soumise à titre informatif. Pyonnier n'émet aucune opinion et/ou recommandation à caractère financière, comptable, juridique ou technique dans la Publication.

La Publication ne saurait engager la responsabilité de Pyonnier pour tout dommage, dépense, perte, réclamation et/ou intérêt découlant, notamment, mais sans s'y limiter, d'une utilisation non autorisée, inappropriée ou non conforme de la Publication, du contenu de la Publication.

Pyonnier se réserve le droit d'apporter des modifications à la Publication en raison de révisions, de nouvelles données, de données existantes, mais n'ayant pas été portée à la connaissance de Pyonnier lors de la diffusion de la Publication.

Le texte de cette publication est disponible selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International (CC BY-SA 4.0).



PYONNIER

2021 © **Pyonnier**
Pyonnier, 4260 rue BOYER, Montreal, Quebec, H2J 3C7
514-291-3083
info@pyonnier.com