



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht Februar 2010

H2Ports

Hydrogène dans les ports

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Brennstoffzellen und Wasserstoff
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

HES-SO / HEIG-vd
Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud
Institut d'Energie et Systèmes Electriques, IESE
Membre du réseau de compétences "ENERGIES" de la HES-SO
1, rte de Cheseaux CP
CH-1401 Yverdon

Autoren:

J.-F. Affolter Jean-francois.Affolter@heig-vd.ch
S. D. Marques Dos Santos
P. Morey

BFE-Bereichsleiter: Dr. Stefan Oberholzer
BFE-Programmleiter: Dr. Stefan Oberholzer
BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152915 / 102309

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

An der Hochschule Luzern – Technik & Architektur wurde von Januar 2006 bis August 2009 ein Feldtest mit Brennstoffzellen zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung durchgeführt. Das Projekt fand in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Swisscom (Schweiz) AG, als Anwenderin und American Power Conversion Corporation, als Hersteller von Unterbrechungsfreien Stromversorgungs-Anlagen statt. Bei Stromausfall lieferte statt einer Bleibatterie eine Brennstoffzelle den erforderlichen Strom. Zur Überbrückung des verzögerten Anfahrverhaltens der Brennstoffzelle wurden Superkapazitäten eingesetzt.

Das System war an eine im realen Betrieb arbeitende Mobilfunk-Basisstation der Swisscom (Schweiz) AG auf dem Dach der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw angeschlossen. Die Wasserstoffbereitstellung erfolgte über zwei Druckgasflaschen, die unter der Verbraucherlast der Mobilfunk-Basisstation eine Autonomiezeit von rund 6 Stunden gewährleisteten. Im Feldtest wurden durch monatliche Stromausfall-Simulationen von 5x5 Minuten sowie 2x20 Minuten die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Systems unter Beweis gestellt. Auch bei längeren Unterbruchszeiten von über 4 Stunden sowie während zwei realen Stromausfällen bis zu anderthalb Stunden war das System zuverlässig in Betrieb.

Die Tests wurden über einen Zeitraum von über dreieinhalb Jahren durchgeführt. Nach 350 Starts und einer realen Laufzeit von knapp 100 Stunden wurden die Stromausfall-Simulationen beendet. Unter der Verbraucherlast der Mobilfunkantenne startete die Brennstoffzelle zu 100% zuverlässig. Am Ende der Tests wurde ein Spannungsabfall der Brennstoffzelle von ca. 3.3% gemessen. Die insgesamt gelieferte elektrische Energie betrug 470 kWh. Nach Beendigung der Tests war die Brennstoffzelle noch voll funktionsfähig.

In Ergänzung zu den Feldtests wurde die Umweltbelastung der üblicherweise eingesetzten Bleibatterien mit der Umweltbelastung der Brennstoffzelle verglichen. Innerhalb eines Lebenszyklus von 10 Jahren wird mit der Brennstoffzelle im Vergleich zu den Bleibatterien ohne Recycling eine fast 90%-ige Reduzierung der CO₂-Äquivalente erreicht. Im Vergleich zu den Bleibatterien mit Recycling ergibt sich eine Reduzierung von über 80%.

Während der Laufzeit des Projekts hat sich der Markt im Bereich der Notstromversorgung mit Brennstoffzellen verändert. Verschiedene Hersteller von Brennstoffzellen und Unterbrechungsfreien Stromversorgungs-Anlagen haben deutliche technische Fortschritte erzielt. Die Notstromversorgung zählt heute zu den erfolgversprechenden Anwendungen der Brennstoffzelle im ‚Early Market‘.

Summary

The Lucerne University of Applied Sciences and Arts – Lucerne School of Engineering and Architecture conducted fieldtests with an uninterruptible power supply (UPS) with fuel cell technology since January 2006. The project took place in collaboration with the industrial partners Swisscom (Schweiz) AG, as a user of UPS-systems in telecommunications and the American Power Conversion Corporation as a producer and market leader of UPS-Systems. In this project, the lead-acid batteries were replaced by a PEM fuel cell system. The delayed start-up behaviour of the fuel cell was bridged with supercapacitor technology.

The system was connected to an existing working base station of a telecommunication installation, which was installed on the roof of the Lucerne School of Engineering and Architecture in Horw. Hydrogen was provided by two pressure tanks. The full quantity of Hydrogen assured a stand-alone operation for about 6 hours under the load of the telecommunication base station. The fieldtest included monthly grid failure simulations of 5x5 minutes and 2x20 minutes power failures. Also during grid failure simulations for more than 4 hours and during two real outages up to one and a half hour the system provided the demanded power.

The fieldtest was performed for a period of three and a half years. Excellent results of the approximately 350 start-up's confirm the functionality, reliability and performance of the system. Under the load of the base station the fuel cell system started with a reliability of 100%. At the end of the tests a decrease of the fuel cell voltage of about 3.3% was measured. The fuel cell system was still fully operational at this time. An amount of energy of about 470 kWh was provided.

In addition to the fieldtest, the environmental impact of the lead-acid batteries, which are normally used, and the fuel cell system was investigated. The analysis between the fuel cell system and lead-acid batteries without recycling showed a reduction of CO₂-equivalents of nearly 90% within a life cycle of 10 years. In comparison with lead-acid batteries with recycling there is a reduction of more than 80%.

During the project period the market changed. An increasing number of fuel cell producers and UPS suppliers became aware that the application of fuel cell's as a back-up system respond to critical market demands. They developed ready-to-market products which are suited to achieve early commercialisation success. Hence for the fuel cell UPS application it is no longer the question of functionality but of a successful market entry.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
1.1 Ausgangslage.....	6
1.2 Ziel der Arbeit.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2. Anlagekonzept.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.1 Systemtechnische Integration.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.2 Brennstoffzelle.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.3 Superkapazitäten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4 Controlling und Messdatenerfassung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.5 Wasserstoffbereitstellung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3. Messkonzept	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.1 Testprogramm	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.2 Testaufbau	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4. Testergebnisse und Auswertung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.1 Startverhalten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.2 Lastkurven.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.3 Spannungskurven.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.4 Kennlinie	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.5 Wirkungsgrad	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5. Betriebserfahrungen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.1 Zuverlässigkeit (Start und Betrieb).....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2 Betriebstemperatur	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.3 Superkapazitäten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.4 Wasserstoff und Sicherheit.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5 Betriebskosten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6. Bewertung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7. Umweltbewertung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.1 Batterie.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.2 Brennstoffzelle.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.3 Berechnung der Umweltbelastung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.4 Bewertung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8. Schlussfolgerungen und Ausblick	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9. Symbolverzeichnis.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.1 Lateinische Symbole	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.2 Griechische Symbole.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10. Referenzen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A1 Anlagenschema.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A2 Datenblatt Brennstoffzelle	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A3 Datenblatt Superkapazitäten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A4 Datenblatt Ladegerät.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A5 Datenblatt Batterie.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
A6 Schaubild Strommix Schweiz	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Brennstoffzelle galt in den 1990-er Jahren als *die grosse Zukunftstechnologie* für Fahrzeugantriebe, Hausheizungen und für portable Anwendungen als Batterieersatz. Der Euphorie folgte eine gewisse Ernüchterung, da es in Bezug auf Lebensdauer und Kosten der Brennstoffzelle noch viele offene Punkte zu lösen galt. Dank grossen Investitionen und intensiver Forschung wurden in der Brennstoffzellen-Herstellung markante technische Fortschritte erzielt. Der Schwerpunkt verlagerte sich zu der Frage, in welche geeignete Anwendungen ein Brennstoffzellen-System integriert werden kann.

Ein Bereich, in dem sich die Brennstoffzelle einen erfolgversprechenden Platz auf dem Markt erobern könnte, ist die Notstrom- und Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Diese wird vor allem im IT- und Telekommunikationssektor zunehmend wichtiger, da eine immer grössere Daten- und Verbindungs-Sicherheit bei gleichzeitig grösser werdenden Leistungen gefordert wird. Bei einer Notstromversorgung kommen die Brennstoffzellen temporär zum Einsatz, so dass die für den Dauerbetrieb meist noch zu geringe Lebensdauer kein Nachteil ist. Als Ersatz für Bleibatterien oder Diesel-Generatoren weist ein Brennstoffzellen-System hingegen zahlreiche Vorteile auf:

Brennstoffzellen arbeiten leise und sauber. Es entstehen lokal keine schädlichen Abgase. Eine flexible Anpassung der Anlage an die Bedürfnisse der Anwender ist möglich. Die Leistung kann durch modularen Aufbau der Zellen variiert werden. Die erforderliche Autonomiezeit wird über die bereitgestellte Menge an Wasserstoff angepasst. Im Betrieb kann die verbleibende Autonomiezeit einfach über eine Füllstandsmessung kontrolliert werden. Auch bei wechselnden Umgebungstemperaturen ist die Brennstoffzelle betriebsfähig und ein geringer Service- und Wartungsaufwand ist durch eine lange Betriebsbereitschaft zu erwarten.

Aufgrund dieser günstigen Voraussetzungen hat die Hochschule Luzern – Technik & Architektur in einem ersten Projekt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** im Jahr 2005 eine USV-Anlage mit Brennstoffzellen anstelle von Bleibatterien konzipiert und untersucht. Das Projekt fand bereits in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Swisscom (Schweiz) AG als Anwenderin von USV-Anlagen und American Power Conversion Corporation als Hersteller von USV-Anlagen statt, sowie mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesamt für Energie (BFE).

Nach einem Testlauf im Labor wurde das System im Januar 2006 an eine reale Mobilfunk-Basisstation (GSM/UMTS) auf dem Dach der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw angeschlossen. Monatliche Stromausfälle wurden unter realer Verbraucherlast simuliert, sowie Tests mit externer Last bis zu 8.5 kW durchgeführt. Das Testprogramm wurde zusammen mit Swisscom (Schweiz) AG ausgearbeitet. In den ersten vier Monaten blieben parallel die Batterien der USV angeschlossen. Ab April bis Ende 2006 lieferten dann ausschliesslich die Brennstoffzelle respektive beim Anfahren die Superkapazitäten den Notstrom. Auch einen netzbedingten Stromausfall, der anderthalb Stunden dauerte, sowie Dauertests von bis zu vier Stunden wurden durch die Anlage problemlos überbrückt. Insgesamt startete die Brennstoffzelle im ersten Betriebsjahr 145 Mal bei einer Gesamlaufzeit von 39 Stunden. Damit war das Ziel dieses ersten Projekts – der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Systems – erreicht. Aufgrund der sehr guten Testergebnisse beschlossen die Projektpartner, den Feldversuch in einem Folgeprojekt bis im Mitte 2009 fortzusetzen.

Parallel zu den laufenden Tests führte die Hochschule Luzern – Technik & Architektur eine Studie zu einer Anwendung der Brennstoffzelle im Bereich mobiler Basisstationen für das Sicherheitsfunknetz POLYCOM durch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

H₂Ports

Hydrogène dans les ports

S.D. Marques Dos Santos, P. Morey
IESE 2010



HEIG-VD
Institut d'Energie et Systèmes Electriques

Dernière mise à jour faite le : 11 février 2010

Table des matières

1	Introduction	1
1.0.1	Résumé	1
1.0.2	Motivations	2
1.0.3	Objectifs	3
1.0.4	Enquête menée dans le cadre du projet H ₂ Ports	3
1.1	Sources de H ₂	4
1.1.1	Les hydrocarbures	4
1.1.2	L'eau	4
1.2	Stockage	7
1.2.1	H ₂ sous pression	7
1.2.2	H ₂ liquide	8
1.2.3	Adsorption et absorption dans des matériaux solides	9
1.2.4	Acide formique	9
1.3	Transport	10
1.3.1	Transport par route	10
1.3.2	H ₂ en gazoduc	10
1.4	Distribution	11
1.5	Consommation	11
2	Stations de remplissage	12
2.1	Air Products	12
2.1.1	Stationary fueling station	12
2.1.2	Mobile fueling station	12
2.2	H ₂ Logic	14
3	Dimensionnement d'une installation de production pour un port	15
4	Installation de production à la HEIG-VD	18
4.1	Description	18
4.2	Dimensionnement pour la production de H ₂ à la HEIG-VD	19
4.2.1	Electrolyseur	19
4.2.2	Stockage	19
4.3	Travail nécessaire à produire une mole de H ₂ et rendement	20
4.3.1	Travail à fournir à l'électrolyseur	20
4.3.2	Travail à fournir au compresseur	20
4.3.3	Part de l'énergie de l'hydrogène pour la compression	21
4.4	Rendement total d'une installation de production d'hydrogène	22
4.5	Les Gaz réels	23
4.5.1	Travail à fournir au compresseur	23
4.5.2	Rendement global de l'installation (Cas des gaz réels)	24
4.5.3	Sensibilité des variables	25

4.6	Recherche de fournisseur	26
4.6.1	Électrolyseurs	26
4.6.2	Compresseurs à hydrogène	29
4.6.3	Bonbonnes	31
4.7	Réalisation et partie expérimentale	33
4.7.1	L'électrolyseur	33
4.7.2	Surpresseur Haskel AGT 7/30	35
4.7.3	Rendement total de notre installation de production d'hydrogène	38
4.7.4	Conclusion	40
5	Prix de revient de l'H₂	42
5.1	Prix de revient de l'H ₂ produit à la HEIG-VD	42
5.2	Prix de revient de l'H ₂ fourni par Carbagas	43
5.3	Comparaison avec l'essence	44
6	Conclusion	45
6.1	Dimensionnement d'une installation de production pour un port	45
6.2	Installation de production à la HEIG-VD	45
6.3	Matériel	46
6.4	Partie expérimentale	46
6.5	Prix de revient de l'H ₂	47
A	Enquête menée dans le cadre du projet « H₂Ports »	50

1 Introduction

Lors des dernières décennies, les énergies fossiles furent responsables de plusieurs troubles qui ont des conséquences à l'échelle mondiale. Les dégâts fait à l'environnement dû au rejet de gaz à effet de serre et les nombreuses marées noires sont les exemples les plus voyants.

À cela, il faut aussi rajouter les problèmes économiques : les deux chocs pétroliers de 1973, où le prix du brut fut artificiellement augmenté par les pays membres de l'OPEP, et de 1979, l'arrêt brutal des exportations iraniennes fit grimper le prix de l'essence et diminuer les réserves des pays consommateurs. Quand à l'avenir de ces combustibles, nous savons que les ressources se chiffrent qu'à quelques dizaines d'année, et on peut ajouter que leur raréfaction créera un chaos économique si nous ne réussissons pas à trouver des solutions alternatives à temps. Un nouveau carburant est donc nécessaire. Idéalement, il devra être abondant et équitablement distribué pour éviter que certains pays ne s'en octroient le monopole et puissent dicter les cours des marchés. De plus, il devra émettre le minimum de polluant, pour préserver notre environnement.

L'hydrogène, avec une densité énergétique trois fois plus grande que l'essence, est peut être un de ces futurs carburants. Malheureusement, plusieurs barrières technologiques empêchent la généralisation de son utilisation.

Au niveau de son utilisation, la durée de vie des piles à combustible et le prix des matériaux les constituants sont un grand frein. De plus, la production, le stockage et la distribution de l'hydrogène sont des problèmes qu'il faut résoudre avant de pouvoir utiliser cette ressource renouvelable, abondante et surtout non polluante.

1.0.1 Résumé

Le projet H₂Ports vise à promouvoir la mobilité douce, propre et écologique en étudiant la faisabilité technico-économique d'un approvisionnement en hydrogène dans les ports Suisse. Le projet a été mené en trois phase :

- Une partie d'enquête auprès du grand public afin de connaître le besoin potentiel.
- Une partie d'évaluation des ressources nécessaires pour répondre au besoin potentiel.
- Une partie expérimentale où une installation de production a été réalisée et testée.

L'enquête a montré que le public est favorable à une navigation propulsée par pile à combustible (PAC) et serait prêt à l'utiliser.

L'évaluation des ressources nécessaires a montré qu'une production locale n'est pas économiquement envisageable à moins d'avoir une flotte considérable qui s'approvisionne au même endroit.

La partie expérimentale a permis de tester du matériel de production d'hydrogène à petite échelle et va permettre de produire de l'hydrogène renouve-

lable pour l'utilisation dans la navigation avec le bateau à pile à combustible de la HES-SO, *l'Hydroxy3000*. L'installation permettra aussi de réaliser des expérimentations pratiques avec les étudiants, dans le cadre des laboratoires d'énergie et de la postformation.

1.0.2 Motivations

Actuellement, plusieurs PME sont prêtes à commercialiser des bateaux électriques alimentés par piles à combustibles de type PEM. Le seul frein à la mise en pratique est le manque d'accès au type de combustible nécessaire, l'hydrogène.

Il existe des indices indiquant que notre société évolue vers une société où l'hydrogène sera un vecteur énergétique prépondérant. Au niveau européen, nous pouvons mentionner le projet *CUTE* (Clean Urban Transport for Europe)[S1]. Ce projet a équipé plusieurs villes européennes avec des bus fonctionnant avec des piles à combustible qui assurent aujourd'hui un service régulier.

De plus, la HES-SO, a déjà démontré l'applicabilité de pile à combustible à la navigation. Grace aux projets précédents, bateaux de la série Hydroxy (figure 1.1). L'étape suivante est donc de faire un projet complet allant de la production d'hydrogène renouvelable à son utilisation sur nos lacs. En démontrant l'ensemble de la chaîne dans un projet pilote et de démonstration, non seulement les instituts de recherche apportent une solution complète et consistante pour notre avenir énergétique, mais elle offre surtout aussi aux entreprises associées au projet un support important pour une commercialisation de leurs produits.



FIGURE 1.1 – L'Hydroxy 3000 de la HEIG-VD dans le port de Monaco.

1.0.3 Objectifs

Les objectifs de ce projet sont :

- Dimensionner les besoins dans les ports et indiquer aux développeurs d'électrolyseurs les modèles/puissances qui seront nécessaires
- Préparer l'intégration d'un électrolyseur prototype dans un système de production d'hydrogène dans les ports
- Tester le matériel dans des conditions pratiques d'utilisation
- Découvrir et analyser les problèmes encore à résoudre pour une intégration à plus grande échelle

1.0.4 Enquête menée dans le cadre du projet H₂Ports

L'enquête concernait la mobilité lacustre basée sur de nouvelles énergies *douces*, dans le cadre du projet H₂Ports : la propulsion de bateaux à l'aide de piles à combustibles. Différentes instances, industries, associations, chantiers navals, ports et d'autres reçurent ce questionnaire. Sur 110 envois, 15 % ont été retournés, un nombre juste suffisant pour considérer cette enquête comme valable.

Il ressort de cette enquête que dans 3/4 des formulaires retournés les bateaux propulsés par piles à combustibles sont commercialisables et les répondants seraient disposés à en acheter ou à les utiliser (figure 1.2). L'enquête est disponible dans les annexes du rapport.

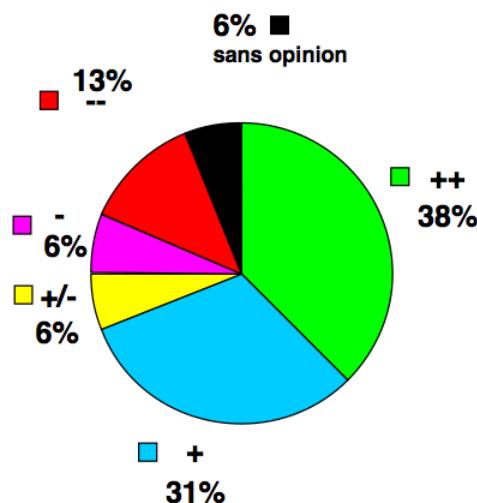


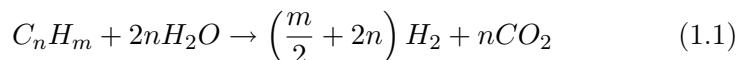
FIGURE 1.2 – Seriez-vous disposé à acheter ou utiliser un bateau motorisé par une pile à combustible ?

1.1 Sources de H₂

L'hydrogène est le plus souvent produit par extraction des hydrocarbures par voie chimique. L'hydrogène peut cependant aussi être extrait de l'eau par biochimie, par électrolyse, par réduction chimique ou par thermolyse. Ces dernières sont moins développée pour une production de masse par rapport au reformage d'hydrocarbures.

1.1.1 Les hydrocarbures

Le reformage consiste à libérer l'hydrogène contenu dans les hydrocarbures à l'aide de vapeur (vaporeformage) à très haute température (700-1100°C). Le résultat de la réaction produit un mélange de gazeux d'hydrogène et de gaz carbonique.



Le gros inconvénient de ce procédé est qu'il génère beaucoup de gaz carbonique. Son rendement est de 55 à 65 %. [4]

Le Kværner-process est un procédé qui consiste à séparer le carbone et l'hydrogène à très haute température (~1600°C).



L'avantage de ce procédé est qu'il sépare les hydrocarbures en hydrogène et carbone pur. Le rendement est de l'ordre de 48 %. [S2]

Le biogaz issu de déchets organiques peut être une source d'hydrogène renouvelable. Celui-ci sera décomposé par vaporeformage afin de libérer l'hydrogène.

1.1.2 L'eau

La biochimie peut être utilisée pour produire de l'hydrogène. En effet, certaines algues produisent spontanément de l'hydrogène sous certaines conditions de stress. Cependant cette voie de production est encore en cours de développement et ne permet pas encore une production de masse rentable.

Des ondes radios peuvent être utilisées pour décomposer l'eau salée. Il fut découvert en 2007 que lorsque qu'une solution NaCl - H₂O est soumise à une radiation polarisée de 13.56 MHz, celle-ci fait vibrer les ions de sodium. Dû aux forces de van der Waals les atomes d'oxygène se mettent

aussi à vibrer, résultant en une séparation des atomes d'oxygène et d'hydrogène. La rentabilité économique de cette méthode n'est pas encore prouvée. [S2]

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer directement les atomes d'oxygène et d'hydrogène en faisant circuler un courant dans l'eau. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir être quasiment non polluante si l'énergie électrique est fournie par des sources d'énergie renouvelables tel que le solaire photovoltaïque, l'éolien ou de l'hydraulique. L'électrolyse peut se faire à haute température, réduisant le besoin en électricité. En effet la réaction requiert un apport en chaleur qui ne sera pas apporté par l'électricité. Le rendement des électrolyseurs peut être de l'ordre de 50 à 80 %. [S2]

La réduction chimique consiste à utiliser de l'hydroxyde de sodium et de l'aluminium pour générer de l'hydrogène avec de l'eau. L'hydroxyde de sodium n'est qu'un catalyseur. La réaction globale est décrite de la façon suivante :

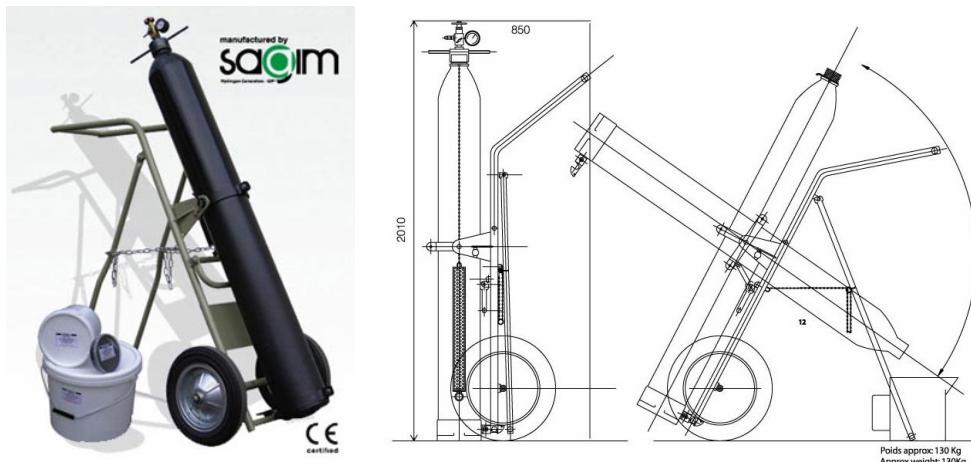
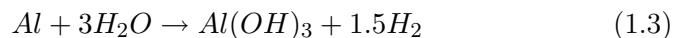
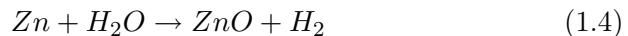


FIGURE 1.3 – Installation de production d'hydrogène par réduction chimique [S3]

Théoriquement un kilogramme d'aluminium peut produire 112 grammes d'hydrogène. Ce type de production est souvent utilisé pour des besoins militaires.

L'hydrolyse thermochimique est réalisée en faisant s'oxyder du zinc en présence de vapeur d'eau. La réaction est effectuée à des températures allant de 200 à 550 °C.



Pour régénérer (désoxyder) l'oxyde de zinc, une centrale à concentration solaire est utilisée afin de compenser la réaction chimique fortement endothermique. Cette réaction se fait spontanément à des températures avoisinant 2000 K. Cette température peut être abaissée à 1'200 °C en utilisant du carbone comme réactif. [S4], [S5]

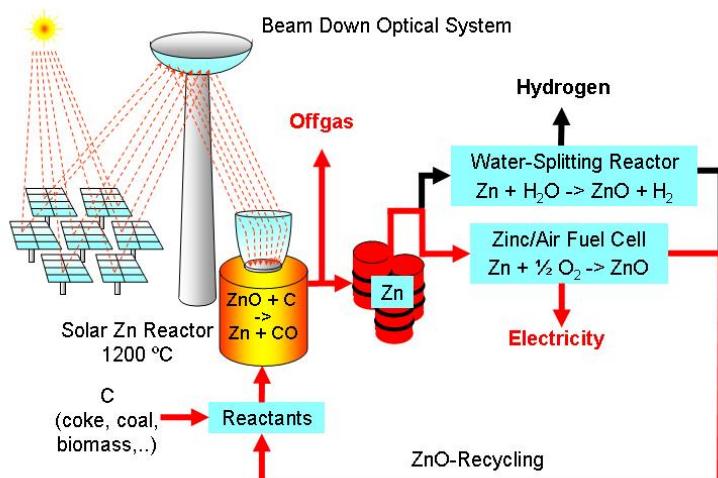


FIGURE 1.4 – Cycle de production d'hydrogène par hydrolyse thermochimique de l'eau avec du zinc [S4].



FIGURE 1.5 – Fournaise solaire à l'institut Paul Scherrer [S4].

La thermolyse utilise le fait que l'eau se décompose spontanément à très haute température. À 2'200°C environ trois pour cent de toutes les molécules de H₂O sont décomposées. À 3'000°C plus de la moitié des molécules sont décomposées. Ceci pose néanmoins des difficultés techniques dues aux contraintes sur les matériaux à si haute température. Celles-ci empêchent un usage direct industriel de ce phénomène. Mais des avancées ont été faites dans la décomposition à l'aide de catalytiques à plus faible température. Hydrosol-2 est une centrale solaire à concentration pilote de 100 kW en Espagne. Celle-ci produit directement de l'hydrogène par thermolyse de l'eau sans production de CO₂. [S2]



FIGURE 1.6 – Centrale solaire à concentration Hydrosol-2 [S6]

1.2 Stockage

De part le fait que la densité de l'hydrogène est très faible, son stockage est techniquement difficile ainsi que coûteux, surtout quand il s'agit d'un stockage mobile. Le stockage peut se faire de plusieurs façon différentes qui ont tous leurs avantages et leurs inconvénients.

1.2.1 H₂ sous pression

Le stockage d'hydrogène sous pression est la technique la plus répandue. Il s'effectue sous forme d'assemblage de bonbonnes cylindrique. Ce type de stockage à deux inconvénients majeurs qui sont le poids et le volume. Remplie à une pression de 200 bars, ce type de stockage offre un rapport de masse/volume de l'ordre de 16 kg_{H₂}/m³ (à 20°C). Des améliorations récentes avec des bonbonnes en fibres bobinées et résine ont permis d'augmenter la pression de stockage à 350 bars, voir à 700 bars tout en diminuant le poids des bonbonnes. Le rapport de stockage masse/volume

pas donc respectivement à 28 kg_{H₂}/m³ et 57 kg_{H₂}/m³ (à 20°C).

En ce qui concerne le **stockage massique** (Massee_{H₂}/Massee_{Réservoir}) les valeurs se trouvent entre 4.2 et 5.6 % à 200 bars et entre 5.7 et 7.2 % à 450 bars.

L'énergie nécessaire au stockage sous pression sera traité dans le chapitre 4.3.

1.2.2 H₂ liquide

À pression atmosphérique l'hydrogène devient liquide à 20.3 K (-252.8 °C). Sous sa forme liquide, il est 800 fois plus dense que le gaz, à 1 atm, d'où un intérêt majeur (à priori) pour le stockage. Sa masse volumique est de 70.9 kg/m³ (équivalent à 864 bars à 20°C). Toute la difficulté de ce type de stockage réside dans la cryogénie. En effet, le point critique de l'hydrogène se trouve à -233.96 °C/ 13.15 bars ce qui oblige à le stocker à des températures extrêmement basses. L'hydrogène est donc stocké dans des cryostats, récipient à double parois entre lesquelles est fait le vide qui évite l'apport de chaleur par conduction directe. Le volume de ces cryostats peut aller du litre à plusieurs milliers de mètres cubes. Leur isolation thermique, aussi bonne soit-elle, n'est pas totale ce qui résulte en une ébullition permanente de l'hydrogène liquide. Un cryostat n'est donc pas totalement étanche afin de permettre le dégagement de l'hydrogène gazeux. L'évaporation résulte en une perte d'environ 1 % de la masse stockée par jour. En ce qui concerne le stockage massique, le rapport de masse est d'environ 6.5 %.

L'énergie thermique théorique à retirer de l'hydrogène pour le rendre liquide se compose de :

- La somme de l'énergie nécessaire pour refroidir l'hydrogène gazeux (chaleur massique = 14'304 J/(kg·K)).
- L'énergie nécessaire à la liquéfaction (chaleur latente = 452 kJ/kg)
- L'énergie mise en jeu lors de la conversion ortho/parahydrogène. L'hydrogène, à température ambiante, est composé d'environ 75 % d'orthohydrogène et 25 % de parahydrogène. L'orthohydrogène est de l'hydrogène composé de molécules dans lesquelles les deux protons (un dans chaque atome de la molécule) ont des spins parallèles et de même sens. Le parahydrogène est de l'hydrogène composé de molécules dans lesquelles les deux protons ont des spins antiparallèles. L'orthohydrogène devient instable à basse température et se transforme spontanément en parahydrogène, libérant de la chaleur.

La liquéfaction de l'hydrogène consomme une part allant de 30 à 40 % de l'énergie contenue dans l'hydrogène, suivant l'isolation thermique du liquéficateur ainsi que de la taille et la capacité de production de l'installation de production.

1.2.3 Adsorption et absorption dans des matériaux solides

L'adsorption d'un gaz comme l'hydrogène par un solide résulte de l'augmentation de la densité du gaz à la surface du solide par l'effet des forces intermoléculaires. Celle-ci augmente avec la pression et est d'autant plus importante plus la température est basse. Etant un phénomène purement physique, le processus est réversible. La difficulté de mise en oeuvre de cette technique est d'obtenir des très grandes surface dans un petit volume. Ceci s'obtient à partir de matériaux en poudre très fine et en plus très poreux. En ce qui concerne le stockage massique, il est estimé entre 1 et 2 %. C'est pour ça que cette technique de stockage n'est qu'intéressante en basse température.

L'absorption est la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes de métaux ou d'alliage métalliques pour former des hydrures. Le pouvoir de stockage est tel que la densité volumique dans les hydrures peut être plus élevé que de l'hydrogène liquide. Celui-ci peut atteindre, suivant les matériaux utilisés, jusqu'à 130 kg/m³. Les inconvénients majeurs sont : le poids des réservoirs (rapport de masse $\approx 1\%$) et le prix élevé des matériaux. De plus, lors de l'absorption, les hydrures métalliques se dilatent de 10-15 %. Ceci oblige à construire les bonbonnes avec des géométries internes particulières afin de permettre cette dilatation sans déformer le récipient. L'hydrogène absorbé doit être très pur pour garder la capacité d'absorption. En effet, les hydrures métalliques se gorgent des impuretés (O₂, CO, CO₂) et ne les libèrent plus.

L'absorption est exothermique, ce qui nécessite une évacuation de la chaleur ($\approx 150\text{ kJ/kg}_{H_2}$). La désorption est endothermique et nécessite un apport de chaleur pour que les hydrures métalliques libèrent leurs contenus.

1.2.4 Acide formique

L'acide formique (HCOOH), aussi appelé acide méthanoïque, peut être utilisé comme moyen de stockage de l'hydrogène. En 2006, une équipe de l'EPFL a présenté un système catalytique homogène, basé sur une solution aqueuse de catalyseurs au ruthénium. Celui-ci décompose l'acide formique, à une température d'environ 95 °C, en dihydrogène (H₂) et dioxyde de carbone (CO₂) en proportions égales. Le réacteur est capable de produire dans une large plage de pression (1 – 600 bars) et la réaction ne génère pas de monoxyde de carbone (CO). Le gaz carbonique pourra être utilisé dans un deuxième temps pour générer à nouveau de l'acide formique par hydrogénéation. L'acide formique contient 53 g d'hydrogène par litre à température et pression ambiante, ce qui est deux fois la capacité de l'hydrogène compressé à 350 bars. Pur, l'acide formique est un liquide inflammable à 69°C, ce qui est supérieur à l'essence (-40°C) ou l'éthanol (13°C). Dilué dès 85%, il n'est plus inflammable. L'acide formique

dilué est même inscrit sur la liste des additifs alimentaires de l'administration américaine des denrées alimentaires et des médicaments (FDA)

1.3 Transport

1.3.1 Transport par route

À cause du poids élevé des réservoirs à hydrogène un même camion de 40 t transporte dix fois moins d'hydrogène comprimé que de méthane et environ 80 fois moins que d'essence. La quantité d'énergie liée au transport est proportionnelle à la distance. En considérant qu'un camion transporte 50 m³, il pourrait transporter environ 3.5 t d'hydrogène liquide ou environ 700 kg d'hydrogène gazeux à 200 bars. En posant comme hypothèse que le camion consomme environ 30 litres de diesel pour 100 km et qu'il doit parcourir 500 km avec un rendement moteur de 0.2, s'il fonctionnait sur une pile à combustible ayant un rendement de 0.5 il consommerait 20 kg d'hydrogène pour parcourir cette distance, soit 3 % de sa cargaison à 200 bars ou 0.5 % en liquide. Ceci paraîtrait acceptable pour l'approvisionnement des ports, dans la mesure où il y aurait une production d'hydrogène centralisée (par exemple près d'un parc éolien) et qu'il soit transporté vers ceux-ci.

1.3.2 H₂ en gazoduc

La solution des gazoducs est la meilleure en termes de pertes due au transport car elle consomme qu'environ 0.9 % du pouvoir énergétique de l'hydrogène par 100 km parcouru. L'inconvénient est le coût du génie civil nécessaire, ce qui cantonne cette technologie pour le moment à des cas particulier sur des sites industriels. Une solution en exploration est d'ajouter l'hydrogène à certains endroits dans les gazoducs normaux, jusqu'à une proportion de 10-15 % (tolérable par les matériaux utilisés) et de le sortir par membranes ou vapor-reformage à d'autre places. Ceci ne paraît pas être une solution utilisable pour l'alimentation des ports, à moins qu'ils soient proches d'un site industriel produisant ou utilisant de l'hydrogène.



FIGURE 1.7 – Gazoduc en Alaska [S7]

1.4 Distribution

La distribution de l'hydrogène peut se faire par le biais de bornes, similaire à celle se trouvant dans une station essence à l'exception que celle-ci communique avec le véhicule pour connaître les paramètres de remplissage.



FIGURE 1.8 – Borne de distribution d'hydrogène Shell

L'hydrogène peut aussi être distribué à l'état liquide. Par exemple : BMW a développé une voiture fonctionnant avec un moteur thermique à hydrogène utilisant directement l'hydrogène sous forme liquide. L'idée est intéressante car elle allie la fiabilité du moteur thermique est la propreté de l'hydrogène, dans le mesure où celui-ci est produit de façon renouvelable. Ceci n'est actuellement malheureusement pas le cas à grande échelle, l'hydrogène étant en général produit par reformage de gaz naturel. Dans ce cas, cette voiture consommant 4 kg_{H₂} non renouvelable par 100 km équivaut à 29 litres d'essence par 100 kg (rendement de reformage du gaz naturel de 65 % et 30 % de l'énergie de l'H₂ pour la liquéfaction).

1.5 Consommation

L'hydrogène peut être consommé de deux façons différentes. Dans une pile à combustible, produisant directement de l'électricité ou dans un moteur thermique. La pile à combustible offre les grands avantages d'avoir un rendement intéressant (~ 60 %) et de fonctionner de façon quasi silencieuse. Le moteur thermique, quant à lui, a un moins bon rendement mais l'expérience acquise pendant l'ère du pétrole lui offre l'avantage de la fiabilité et une durée de vie encore beaucoup plus longue (environ 5'000 h, contre 1'000 à 2'000 h pour une pile à combustible du type PEM).

2 Stations de remplissage

Pour les stations de remplissage plusieurs solutions sont envisageable en fonction de la quantité d'hydrogène consommée :

- Petite à moyenne quantité : Stations réservoirs fixes ou mobiles à recharger une fois vide.
- Moyenne à grande quantité : Stations avec production d'hydrogène sur place ou transport par pipeline.

Ci-après quelques fournisseurs de solutions :

2.1 Air Products

Air Products est une entreprise internationale qui s'est lancé dans le secteur de l'hydrogène depuis une cinquantaine d'années. Ils proposent des stations de remplissages destinées au secteur du transport. D'autres entreprises proposent aussi des produits similaires.

2.1.1 Stationary fueling station

La Stationary fueling station (figure 2.1) est une station fixe contenant des réservoirs. Elle dispose d'un dispositif de remplissage et est destinée à remplir le réservoir de véhicules jusqu'à 350 bars. Cette station à la possibilité d'être ravitaillée par camion citerne ou par une production d'hydrogène locale. La seule contrainte est qu'elle doit être alimentée à une pression minimum de 15 bar (hydrogène) et en air comprimé à 10 bars (1.3 - 1.8 Nm³/min) pour alimenter le surpresseur à hydrogène.

2.1.2 Mobile fueling station

La Mobile fueling station (figure 2.2) est une station remorque mobile contenant des réservoirs. Elle a une capacité utile de 30 à 110 kg d'hydrogène. Celle-ci peut être une solution idéale pour faire de la promotion et pour tester des zones pour une implantation future.



FIGURE 2.1 – Station de remplissage Air Products [S8]



FIGURE 2.2 – Station de remplissage mobile Air Products [S8]

2.2 H₂ Logic

H₂ Logic est un entreprise danoise qui travail dans le domaine de l'hydrogène depuis 2003. Elle propose des solutions complètes de stations de remplissage, rechargeable ou à production locale. H₂ Logic fabrique des piles à combustible allant de 0,5 à 40 kW pour répondre au besoins de différentes applications telles : fauteuils roulants, véhicules de services (aéroport, hôpital, chariot élévateur) ou petite voiture citadine.



FIGURE 2.3 – Station de remplissage H₂ Logic fixe et transportable [S9]

La solution de station transportable, du type container, coûte environ 130'000 Euros. Selon H₂ Logic, une production locale n'est rentable qu'en dessus d'une consommation annuelle de 20'000 Nm³.

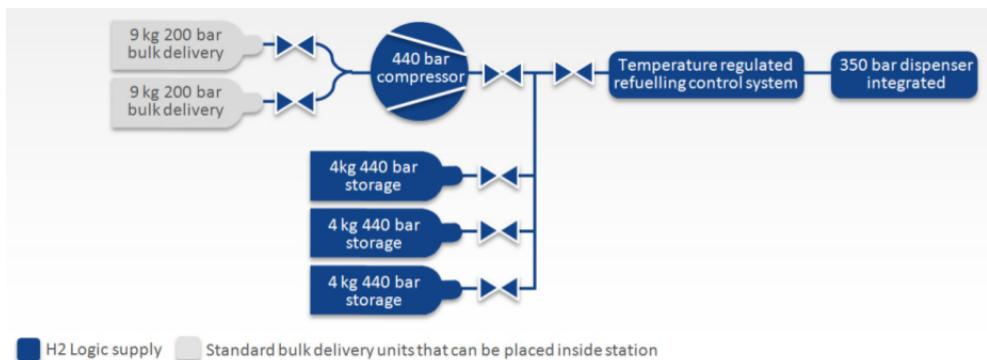


FIGURE 2.4 – Fonctionnement des stations H₂Logic [S9]

3 Dimensionnement d'une installation de production pour un port

Un document *Excel* a été créé afin d'estimer la quantité d'hydrogène nécessaire à produire pour subvenir aux besoins d'une flotte donnée ainsi que le coût de production approximatif. Ce document permet d'avoir un aperçu rapide des grandeurs caractéristiques.



FIGURE 3.1 – Bateau Hydroxy 3000 fonctionnant sur pile à combustible.

Le tableau 3.1 montre le type d'approvisionnement à favoriser en fonction de la consommation annuelle selon les principes actuellement en vigueur [S10].

Consommation annuelle	Mode d'approvisionnement
1'000 à 25'000 Nm ³	Cadres de bouteilles
25'000 à 100'000 Nm ³	Transfert de pression ¹
100'000 à 500'000 Nm ³	Trailers semi-remorque
> 500'000 Nm ³	Production sur place

TABLE 3.1 – Type d'approvisionnement à favoriser en fonction du volume annuel consommé

La figure 3.2 illustre un exemple de situation où il y aurait vingt bateaux de même puissance que l'Hydroxy 3000 de la HEIG-VD.

1. Approvisionnement par camion, transfert dans un cadre de bouteilles fixes.

Calcul pour le projet H2ports (base pour le dimensionnement)		
DONNEES		
Grandeur	Description	valeur
N_bateaux	Nombre de bateaux de la flotte	20 [1]
P_PAC	Puissance de sortie de la PACo	3 [kW]
t_autonomie	Temps d'autonomie des bateaux entre deux pleins	10 [h]
eta_PAC	Rendement de la PACo	0.5 [1]
eta_helice	Rendement de l'hélice	0.4 [1]
eta_electbat	Rendement de l'installation électrique du bateau	0.9 [1]
p_stockbat	Pression de stockage H ₂ sur le bateau	200 [bar]
p_stockpor	Pression de stockage H ₂ sur le port	200 [bar]
eta_meccom	Rendement mécanique du compresseur	0.92 [1]
eta_motcom	Rendement du moteur électrique du compresseur	0.9 [1]
eta_TDcom	Rendement TD du compresseur	0.8 [1]
GAM	Facteur gamma du cycle TD du compresseur	1.3 [1]
T_com	Température d'entrée du gaz dans le compresseur	290 [K]
p_incom	Pression d'entrée du gaz dans le compresseur	1 [bar]
p_outcom	Pression de sortie du gaz dans le compresseur	200 [bar]
t_com	Temps d'utilisation du compresseur entre 2 pleins	50 [h]
t_electro	Temps d'utilisation de l'électrolyseur entre 2 pleins	50 [h]
eta_electro	Rendement de l'électrolyseur	0.9 [1]
Prix_achkwh	Prix d'achat du kWh électrique	0.25 [FS/kWh]

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion
du Canton de Vaud

IESE

Institut d'Énergie et Systèmes
Électriques de la HEIG-VD

FIGURE 3.2 – Partie données du tableau où les variables sont définies.

La figure 3.3 illustre la page de résultats rendu par le programme.

RESULTATS		
Grandeur	Description	valeur
P_prop	Puissance de propulsion mécanique du bateau	1.08 [kW]
M_H2bat	Masse H ₂ à stocker entre 2 pleins	1.8 [kg]
V_H2stockbat	Volume réservoir du bateau pour stocker H ₂ (litres=l)	100.8 [l]
V_H2stockpor	Volume réservoir du port pour stocker H ₂ (litres=l)	2016 [l]
E_com	Énergie électrique utilisée par compresseur entre 2 pleins	145.41 [kWh]
P_com	Puissance électrique nécessaire au moteur du compresseur	2.91 [kW]
E_electro	Énergie électrique utilisée par l'électrolyseur entre 2 pleins	2333.32 [kWh]
P_electro	Puissance électrique de l'électrolyseur	46.67 [kW]
E_reseau	Energie électrique du réseau entre 2 pleins	2478.73 [kWh]
P_reseau	Puissance électrique du réseau	49.57 [kW]
Cout_flotte	Coût total de la production H ₂ entre 2 pleins pour la flotte	619.68 [FS]
Cout_bat	Coût par bateau de la production H ₂ entre 2 pleins	30.98 [FS]
Cout_kg	Coût de revient de la production H ₂ par kg de H ₂	17.21 [FS/kg]

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion
du Canton de Vaud

IESE

Institut d'Énergie et Systèmes
Électriques de la HEIG-VD

FIGURE 3.3 – Partie résultats du tableau.

La figure 3.3 montre que 20 bateaux d'une puissance de 3 kW consomment 2016 litres de H₂ à 200 bars pour 10 heures de navigation, soit 403 Nm³ de H₂. Considérant qu'un bateau de plaisance navigue environ 100 heures par année, il faudrait donc un approvisionnement d'environ 4'000 Nm³ de H₂ par année. Dans ce cas de figure, selon le tableau 3.1 l'approvisionnement se ferait par cadres de bouteilles.

Afin de garantir une vitesse de croisière d'environ 15 km/h (8 noeuds), pour un petit bateau de plaisance, il faut une puissance constante d'environ 10 kW. Dans ce cas il faut qu'il y ait au moins 38 bateaux pour que la consommation soit suffisante pour passer au transfert de pression, 149 bateaux pour passer aux trailers semi-remorque et 745 bateaux pour qu'une production sur place soit envisageable !

Pour exemple : La figure 3.4 illustre une station de production et de distribution d'hydrogène (USA). Elle est autonome grâce à 80 kWc de panneaux solaires, procurant en même temps de l'ombre sur un parking. Sa capacité de production est de 12 kg de H₂ par jour. Le coût d'une telle installation est d'environ 3 millions de dollars (1.5 millions pour la partie solaire, 1.5 millions pour la partie production de H₂).



FIGURE 3.4 – Station hydrogène aux USA (SMUD, Sacramento, CA)

4 Installation de production à la HEIG-VD

4.1 Description

La figure 4.1 décrit les différentes chaînes possibles de production, stockage et de distribution de l'hydrogène.

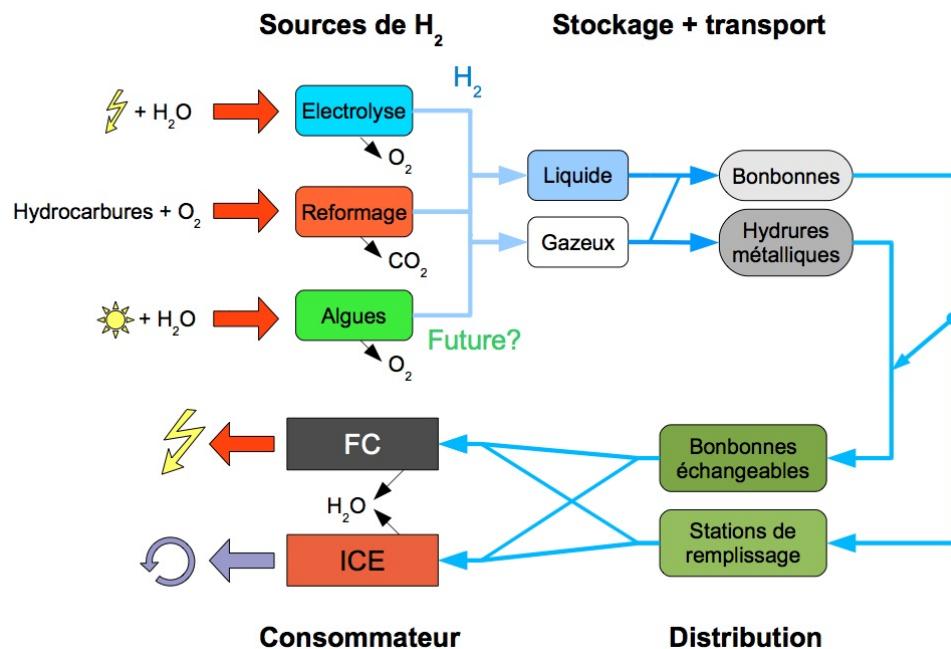
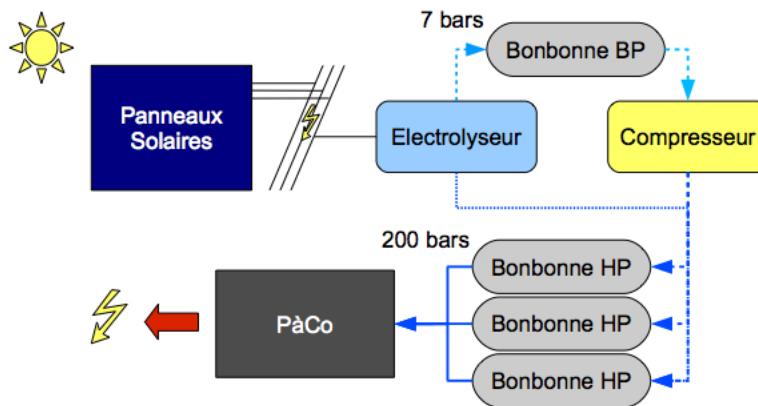


FIGURE 4.1 – Chaîne de production, stockage et de distribution de H₂

Dans le cadre du projet H₂Ports, la chaîne sera composée d'une production par électrolyse, un stockage gazeux dans des bonbonnes et d'une distribution du type station de remplissage.

FIGURE 4.2 – Chaîne de production, stockage et de distribution de H₂

4.2 Dimensionnement pour la production de H₂ à la HEIG-VD

4.2.1 Electrolyseur

Les besoins en hydrogène pour le bateau H3000 sont d'environ 10 kg par année. Pour connaître quel volume cela représente, il faut calculer la quantité de matière en jeu. Une mole de H₂ pèse 2 grammes, ce qui correspond à 5'000 moles de H₂. Dans les conditions de pression et de température normales (1 atm, 20°C), une mole de gaz occupe :

$$V_m = \frac{R \cdot T}{P} \cong 24 \text{ litres/mol} \quad (4.1)$$

Nous avons donc besoin d'un volume d'environ **120 · 10³ litres** de H₂ par année. En considérant que l'électrolyseur fonctionnerait environ 10 mois par année (~ 300 jours) et une dizaine d'heures par jour, il travaillerait donc environ 3000 heures par année. Pour subvenir au besoin, l'électrolyseur devrait donc produire **40 litres de H₂ par heure**.

4.2.2 Stockage

Vu que le but est de produire pendant presque toute l'année et de tout consommer sur une période d'environ 3 mois, il faut pouvoir stocker au moins les 3/4 de la production annuelle. Cela veut dire qu'il faut pouvoir stocker au moins 90 m³.

- **Bonbonne à hydrures métalliques** : Pour stocker un tel volume il faudrait environ 120 bonbonnes de 760 Nl. À environ 800 € pièce, ceci n'est pas une solution envisageable.

En ce qui concerne l'utilisation pour la pile à combustible : 1 m³ d'hydrogène contient 3 kWh. Donc une puissance de 1 W correspond à un débit de 92 μ l/s. En considérant un rendement de $\eta_{FC} = 0.4$ et une puissance de 2.5 kW, le débit nécessaire à une pile à combustible serait de 41.6 litres/min. Une bonbonne à hydrures métalliques (HM), de 760 Nl, peut donner un débit maximum de 6 litres/min. Il en faudrait donc au moins sept pour garantir le débit nécessaire. La solution des HM n'est donc pas utilisable pour le stockage, ni pour l'alimentation de la pile à combustible, question de coût ($\sim 153'000$ CHF) et de gestion.

- **Bonbonnes à 200 bars** : Pour stocker 90 m³ à 200 bars, il faudrait un volume de 450 litres, soit 9 bonbonnes de 50 litres. Cette solution est nettement plus envisageable, mais elle nécessite l'usage d'un compresseur ainsi qu'une bonbonne tampon basse pression.

4.3 Travail nécessaire à produire une mole de H₂ et rendement

Nous posons comme postulat que l'hydrogène est un gaz parfait. Ce postulat, acceptable pour les conditions standards¹, est légitimé au paragraphe 4.5.

4.3.1 Travail à fournir à l'électrolyseur

Le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène est de 39.33 kWh/kg. La masse molaire de l'hydrogène (H₂) est de $\rho = 2.0158$ g/mol. L'énergie molaire de l'hydrogène est donc de $E_{M_{hy}} = 0.08$ kWh/mol.

Avec comme hypothèse que l'électrolyseur a un rendement de $\eta = 80\%$, il faut fournir au moins 0.1 kWh par mole d'hydrogène produite.

4.3.2 Travail à fournir au compresseur

En partant du principe que la compression se fait en régime adiabatique, le travail de compression peut s'exprimer de la façon suivante :

$$W_{comp} \cong \frac{n \cdot R \cdot T}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1 - \frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [J] \quad (4.2)$$

γ étant égal à $\frac{i+2}{i}$ et i étant le nombre de degrés de liberté des molécules considérées. Dans le cas d'une molécule diatomique, comme l'hydrogène, $\gamma=7/5$.

A ce travail, il faut ajouter le rendement du moteur électrique ($\sim 90\%$), le rendement mécanique du compresseur ($\sim 92\%$) et le rendement thermodynamique ($\sim 80\%$).

1. Pression : 1 bar Température : 293.15 K

L'énergie nécessaire pour la compression d'une mole s'exprime donc par :

$$W_{M_{comp}} \simeq \frac{1}{\eta_{el} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{th}} \cdot \frac{R \cdot T}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [J] \quad (4.3)$$

4.3.3 Part de l'énergie de l'hydrogène pour la compression

Afin de déterminer quel part de l'énergie de l'hydrogène est requise pour la compression, il suffit de diviser $W_{M_{comp}}$ par $E_{M_{hy}}$.

$$p = \frac{W_{M_{comp}}}{E_{M_{hy}}} \quad [1] \quad (4.4)$$

p_1 sera considéré comme étant 1 atm (~ 1 bar) et la température T de 20°C (293.15 K).

La figure 4.3 illustre la part de l'énergie de l'hydrogène requise pour la compression avec et sans rendement du compresseur.

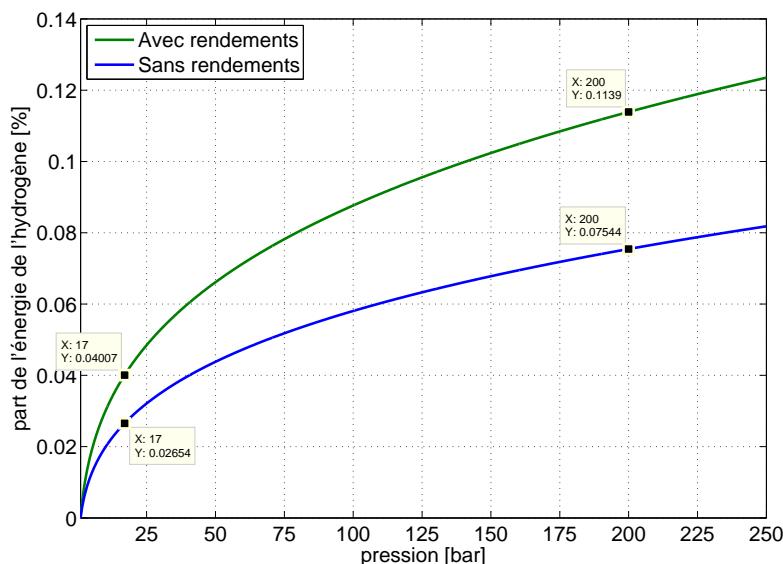


FIGURE 4.3 – Part de l'énergie de l'hydrogène en fonction de p_2 , pour $p_1=1$ bar et $T=293.15$ K

La figure 4.3 montre que la compression à 200 bars consomme 11 % de l'énergie de l'hydrogène, elle serait de 4% pour un stockage en hydrures métalliques, avec les hypothèses posées sur les rendements du compresseur. Elle montre aussi que la part d'énergie qui va réellement dans la compression est de 9% à 200 bars tandis qu'elle serait de 3 % pour un stockage en hydrures métalliques.

4.4 Rendement total d'une installation de production d'hydrogène

Le rendement global s'exprime de la façon suivante :

$$\eta = \frac{E_{M_{hy}}}{\frac{E_{M_{hy}}}{\eta_{electrolyse}} + W_{M_{comp}}} \quad [1] \quad (4.5)$$

La figure 4.4 illustre le rendement global en fonction de la pression de stockage dans les conditions $p_1=1$ bar, $T=293.15$ K.

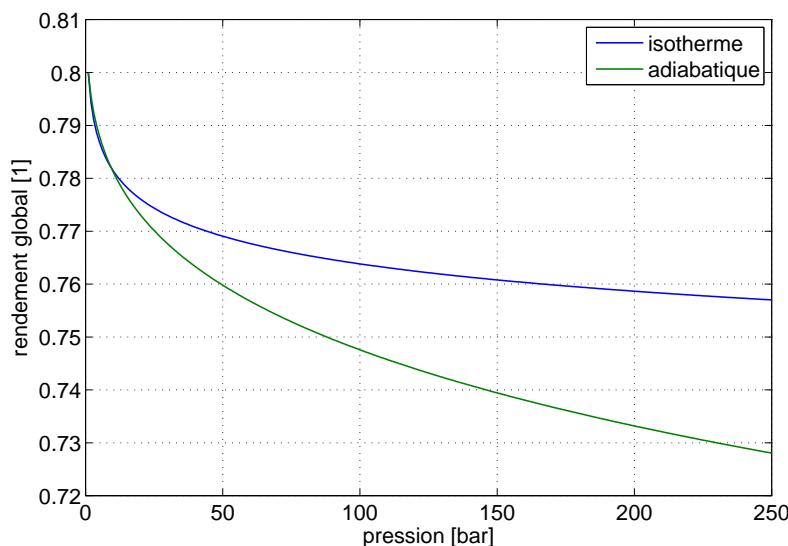


FIGURE 4.4 – Rendement global d'une installation en fonction de p_2 , pour $p_1=1$ bar et $T=293.15$ K

La figure 4.4 montre que le rendement théorique du système électrolyse-compression est de 73 % pour un stockage à 200 bars. Dans le cas où le stockage se ferait en hydrures métalliques le rendement global du système serait 5 % meilleur, à 78 %. Ceci dépend évidemment grandement du rendement de l'électrolyseur.

Produire 120 m³ d'hydrogène par an, stockés à 200 bars, consommerait, avec les hypothèses posées, environ 550 kWh électrique. Ceci correspond approximativement à ce que devrait produire l'éolienne HY-600 sur le toit de la HEIG-VD.

4.5 Les Gaz réels

Il est intéressant de voir si le travail de compression pour les gaz réels diffèrent des gaz parfaits. En effet, les hypothèses des gaz parfaits sont les suivantes :

- Les atomes ou molécules du gaz sont assimilés à des masses ponctuelles
- Les molécules sont sans interaction entre elles (énergies potentielle nulle $E_p = 0$)
- La pression est due aux nombreux chocs des molécules sur les parois de l'enceinte

Étant donné que les molécules d'hydrogène sont en interaction entre elles, que la densité de l'hydrogène à une pression de 200 bars et une température de 300 K est d'environ 7.5 mol/l et que l'hydrogène est dans une phase *supercritique*, il est légitime de se poser des questions. [S11]

Nous allons utiliser le modèle de Van der Waals pour décrire le comportement du gaz, l'équation d'état des gaz de Van der Waals est :

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - b) = R \cdot T \quad (4.6)$$

- **a** : Pression de cohésion [5] [S11] [S2]
- **b** : Covolume [5] [S11] [S2]

Ce modèle tient compte des interactions mutuelles d'attraction et de répulsion entre les molécules et de la nature non ponctuelle des molécules. [5] [S2]

4.5.1 Travail à fournir au compresseur

En tenant compte que le travail se fait en régime isotherme, on calcule la valeur du travail par la formule suivante :

$$-\delta W_{comp.} = p \cdot dV \quad (4.7)$$

Avec $p = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a}{V^2}$, on pose la formule suivante pour le travail :

$$-W_{comp} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad (4.8)$$

En remplaçant p par son expression :

$$-W_{comp} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{R \cdot T}{V - b} \cdot dV - \int_{V_1}^{V_2} \frac{a}{V^2} \cdot dV \quad (4.9)$$

Le travail s'exprime par la formule suivante :

$$W_{comp} = -R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} - a \cdot \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \quad [J] \quad (4.10)$$

À cette équation, il faut ajouter le rendement du moteur électrique ($\sim 90\%$), le rendement mécanique du compresseur ($\sim 92\%$) et le rendement thermodynamique ($\sim 80\%$).

L'énergie nécessaire pour la compression d'une mole s'exprime donc par :

$$W_{M_{comp}} \cong \frac{-1}{\eta_{el} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{th}} \cdot \left[R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} + a \cdot \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \right] \quad [J] \quad (4.11)$$

4.5.2 Rendement global de l'installation (Cas des gaz réels)

En utilisant la formule 4.5 de la page 22, il est maintenant possible de calculer le rendement global de l'installation en fonction de la pression et du volume compressé à partir des conditions suivantes :

- $p_1 = 1 \text{ bar}$
- $T = 293.15 \text{ K} (20^\circ\text{C})$

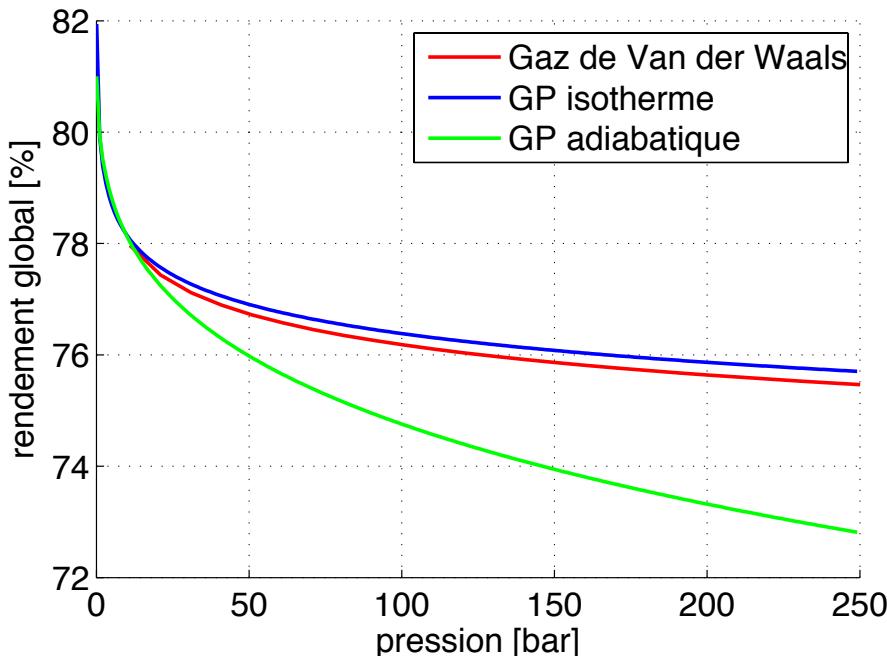


FIGURE 4.5 – Rendement global d'une installation en fonction de p_2 , pour $p_1 = 1 \text{ bar}$, et $T = 293.15 \text{ K} (20^\circ\text{C})$

La figure 4.5 montre clairement que pour des pressions jusqu'à 200 bars, l'approximation des gaz parfaits est acceptable. La différence de rendement entre le cas isotherme des gaz parfaits et des gaz de Van der Waals est négligeable.

4.5.3 Sensibilité des variables

Afin de se rendre compte de l'influence de la variation des facteurs γ et T , le rendement a été tracé (figure 4.6) pour T constant (20°C) et γ variant de $\pm 25\%$. Dans un deuxième temps, le rendement a été tracé pour γ constant (7/5) et T variant de 0° à 100° C.

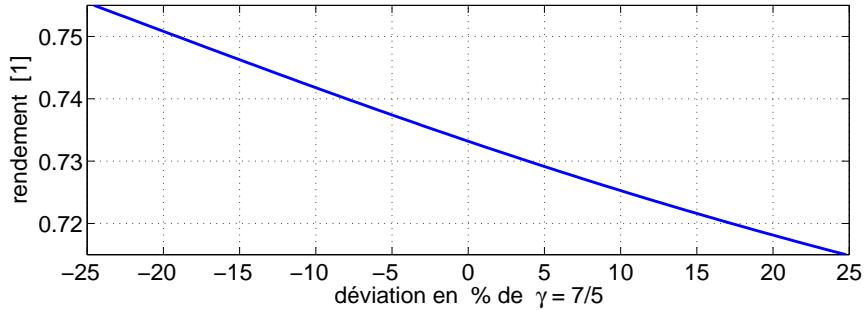


FIGURE 4.6 – Rendement global pour une variation de $\pm 25\%$ de γ , avec $p_1=1$ bar, $p_2=200$ bars, $T=293.15$ K et $\eta_{electrolyse}=80\%$.

La figure 4.6 montre qu'une variation de $\pm 25\%$ de γ a une influence d'environ $\pm 2\%$ sur le rendement global. La sensibilité de cette variable peut donc être jugée faible.

La figure 4.7 illustre la variation de rendement global en fonction de la température de l'hydrogène.

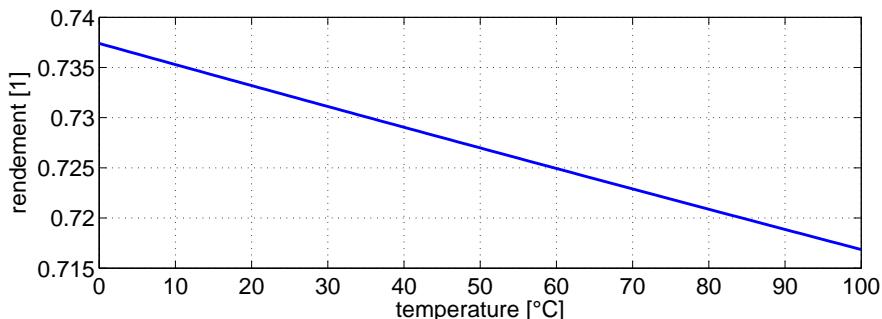


FIGURE 4.7 – Rendement global pour T allant de 0° à 100° C, avec $p_1=1$ bar, $p_2=200$ bars, $\gamma=7/5$ et $\eta_{electrolyse}=80\%$.

La figure 4.7 montre qu'une variation de 1% sur le rendement est provoquée par un changement de température de 41°C. vu que la plage de travail du compresseur sera certainement compris entre 0° et 100° C, la sensibilité de cette variable peut donc aussi être jugée faible.

4.6 Recherche de fournisseur

4.6.1 Électrolyseurs

Claind GH 2400



FIGURE 4.8 – Claind GH 2400

Les électrolyseurs Claind, de la série HG 2000, produisent de 0.2 à 0.6 litre normalisé d'hydrogène par minute. La technologie utilisée est la membrane échangeuse de proton (PEM). Ils disposent d'un déioniseur pour l'alimentation en eau ainsi qu'un séchoir pour l'hydrogène à la sortie. La pureté de l'hydrogène produit est d'au moins 99.9995%. La pression de sortie de 6 bars max. Leurs prix va d'environ 5'200 à 8'000 € HT. [S12]

Proton Hogen



FIGURE 4.9 – Proton Hogen

Les électrolyseurs Hogen de l'entreprise Proton existent en deux modèles : 0.3 ou 0.6 litre normalisé par minute. La technologie utilisée est la PEM. Ils ne dispose pas de déioniseur et donc requiert d'être alimenté en eau déionisée. Les impureté résiduelles sont le l'ordre du ppm (eau, O₂, N₂,...). La pureté de l'hydrogène produit est de 99.9999%. Leurs prix va de 10'400 à 12'000\$ HT. [S13]

Electric Hydrogen



Electrichydrogen produit des électrolyseurs de la technologie PEM. Ils proposent un système produisant 2 litres normalisé par minute destiné à remplir des réservoirs d'hydrures métalliques. La pression de sortie est de 17 bars. La pureté de l'hydrogène est de 99.995%. Son prix est d'environ 10'000 €. [S14]

FIGURE 4.10 – Electric Hydrgen

Heliocentris HG30



L'électrolyseur HG30 de l'entreprise Heliocentris produit 0.5 litre normalisé par minute. La technologie utilisée est la PEM. Il doit être alimenté en eau déionisée. La pureté de l'hydrogène produit est de 99.9999%. La pression de sortie est de 10 bars max. Il a la possibilité d'être mis en parallèle avec d'autres électrolyseurs du même modèle (10 max). Son prix est d'environ 10'000 €. [S15]

FIGURE 4.11 – Heliocentris HG30

ACCAGEN

ACCAGEN produit des électrolyseurs qui délivrent directement une pression de 200 bars à la sortie. Malheureusement, le prix de départ est de 60'000 €. [S16]

Résumé

Fabricant	Débit	Prix HT	Provenance
Electrichydrogen	2 slpm	10'000 €	Canada
Heliocentris	0.5 slpm	11'800 €	Allemagne
Claind HG2200B	0.2 slpm	5'190 €	Italie
Claind HG2400B	0.4 slpm	6'160 €	Italie
Claind HG2600B	0.6 slpm	7'930 €	Italie
Proton HOGEN 300	0.3 slpm	10'400 \$	USA
Proton HOGEN 600	0.6 slpm	12'000 \$	USA
Accagen SPAE	0.5 slpm	60'000 €	Suisse

Choix

D'emblée, nous remarquons que ces électrolyseurs, même si ils sont dans la plage de production nous intéressent, sont destinés à des laboratoires d'analyses plutôt qu'à une production « industrielle ». Les qualités apparaissant assez équivalentes, le choix s'est porté sur le modèle *Claind HG 2400*.

4.6.2 Compresseurs à hydrogène

Une partie de l'étude sur la compression est faite par nos collègues de la HE-Arc [8].

Compresseur PHILL



FIGURE 4.12 – Phill

Une solution intéressante est le compresseur est Phill. Celui-ci est spécialement conçu pour faire le plein de gaz naturel d'une voiture à partir du réseau de gaz domestique. Son prix se situe autour de 5'000 \$. Ce système serait idéal pour notre application, mais malheureusement celui-ci n'est pas conçu pour travailler avec de l'hydrogène. Il ne pourra donc pas être utilisé. [S17]

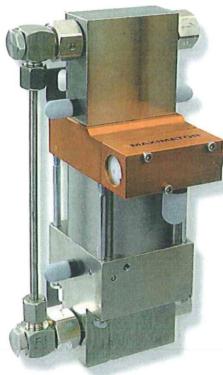
Hydropac



FIGURE 4.13 – hydropac

Hydropac est un fabricant de compresseur spécialement conçu pour l'hydrogène. Ceux-ci fonctionnent à l'aide d'un vérin hydraulique qui comprime l'hydrogène en deux étages. Ils acceptent des pressions d'entrée à partir de 4.8 bars pour une sortie allant jusqu'à 413 bars. Le gros inconvénient de ces compresseurs est leur prix : 25'700 \$ HT. [S18]

Maximator



Maximator fabrique des surpresseurs actionnés pneumatiquement par un réseau d'air comprimé externe à 6 bars. Ce réseau d'air comprimé peut être un simple compresseur ou un réseau pneumatique local. Ces surpresseurs sont parfaitement adapté pour travailler avec de l'hydrogène. Le grand avantage est leur coût relativement faible, environ 9'000 CHF. [S19]

FIGURE 4.14 – Maximator

Haskel



Haskel, tout comme Maximator, fabrique des surpresseurs actionnés pneumatiquement par un réseau d'air comprimé externe. Il s'agit d'un système à piston libre, un piston large animé d'un mouvement alternatif et de deux pistons de faible surface pour la haute pression. Le refroidissement est assuré par l'air d'échappement circulant autour des cylindres et dans un refroidisseur intermédiaire. L'isolation des chambres de compression des gaz et du cylindre d'air comprimé est assuré par trois ensembles de joints dynamiques, empêchant l'air comprimé de contaminer l'hydrogène compressé. Le prix est aussi relativement faible : 8190 CHF.[S20]

FIGURE 4.15 – Haskel

Résumé

Parmi les solutions de compression trouvées, celles qui sont utilisables sont listées dans le tableau ci-dessous.

Fabricant	Compression ratio	Prix	Provenance
Hydropac	--	25'900 \$	USA
Maximator DLE 50-30-GG	1 :50, 1 :30	9'000 CHF	Suisse
Haskel AGT 7/30	1 :100	8'190 CHF	Suisse

Choix

Le choix de compresseur pour les pressions et les volumes souhaitées est quasi inexistant, ceci est confirmé par l'étude spécifique de la HE-Arc [8]. Donc la conclusion est qu'il est nécessaire de développer un modèle spécifique pour cette utilisation. La recherche d'un système a engendré un fort retard dans la partie réalisation du projet, vu la difficulté à trouver des produits susceptibles d'être utilisés.

Notre choix s'est porté sur le système de surpresseur *Haskel* en raison de son rapport de compression, de sa disponibilité, de son coût ainsi que de son délais de livraison.

4.6.3 Bonbonnes

Garbagas (bonbonnes sous pression)

En ce qui concerne le stockage, CARBAGAS peut nous fournir des bonbonnes de 10, 20 ou 50 litres d'hydrogène à 200 bars. Ils ne vendent pas les bonbonnes, ils les louent et les livrent pleines. Ils sont d'accord que nous les utilisons pour stocker l'hydrogène que nous produirons, bien que ce soit contraire à leur politique. Une condition a été fixée : l'hydrogène doit être bien sec, ceci afin d'éviter que les bonbonnes rouillent. [S10]

Type	Volume	Location	Remplissage
1 bonbonne	50 litres	65 CHF/an	81.70 CHF
Rack de 12	600 litres	775 CHF/an	996.00 CHF

Les bonbonnes Cargagas ne sont disponible qu'à l'unité (10, 20 ou 50 litres) ou en rack de 12 bonbonnes de 50 litres et sont forcément livrées pleines.

Dynetek (bonbonnes sous pression)



Dynetek commercialise des bonbonnes haute pression en aluminium - fibres de carbone. Ces bonbonnes sont disponibles en divers volumes (39 à 320 litres) et diverses pressions de service (200 à 450 bars). Dynetek commercialise aussi des unités de stockage fixe pouvant aller jusqu'à 700 bars. Pour l'application à l'Hydroxy, les bonbonnes de 72 litres sont idéales.

FIGURE 4.16 – Dynetek [S21]

Volume	Pression de service	Prix
72 litres	200 bars	2'700 CHF

Ovonic (bonbonnes hydrures métalliques)



Ovonic fabrique des réservoirs d'hydrures métalliques. Ils sont disponibles en 70, 220 ou 900 litres normalisés. Les réservoirs sont prévus pour être chargés à 17 bars et nécessitent une pureté de 99.999% (5.0). Le temps de chargement est d'environ une heure. [S22] Le tableau ci-dessous cite les modèles disponibles ainsi que leur prix.

FIGURE 4.17 – Ovonic

Modèle	Capacité	Poids	Restitution	Prix
7G259B-NPT	75 Nl, 7 g	0.8 kg	1.4 Nl/min	550 Euros
25G259B-NPT	280 Nl, 25 g	2.2 kg	3.5 Nl/min	883 Euros
85G259B-NPT	900 Nl, 75 g	7.0 kg	7.0 Nl/min	1188 Euros

Choix

Notre sélection s'est portée sur les bonbonnes *Dynetek*. D'un point de vue pratique, elles sont utilisables sur *Hydroxy 3000*. De plus, elles ont un grand volume et peuvent supporter les pressions souhaitées.

4.7 Réalisation et partie expérimentale

4.7.1 L'électrolyseur

Dans le cadre du projet *H₂Ports*, la production d'hydrogène est assurée par un électrolyseur *Claind HG 2400*, voire figure 4.8, p. 26. L'affichage de l'appareil donne les principales informations sur la production d'hydrogène.

Le rendement moyen de l'appareil est estimé à 42%, il est inférieur à celui d'un électrolyseur de plus grande taille ayant un débit supérieur². Pour comprendre le faible rendement de notre installation, il est nécessaire de connaître les différents éléments qui la composent et comment leur consommation affectent le rendement.

La figure 4.18 présente un schéma simplifié de l'électrolyseur *Claind HG 2400*, dont voici une liste des principaux éléments :

- Valve d'arrivée d'eau
- Valve de sortie d'oxygène
- Valve de contrôle d'hydrogène
- Valve de sortie d'hydrogène
- Système de contrôle de la pression d'hydrogène
- Système de contrôle de la pression d'oxygène

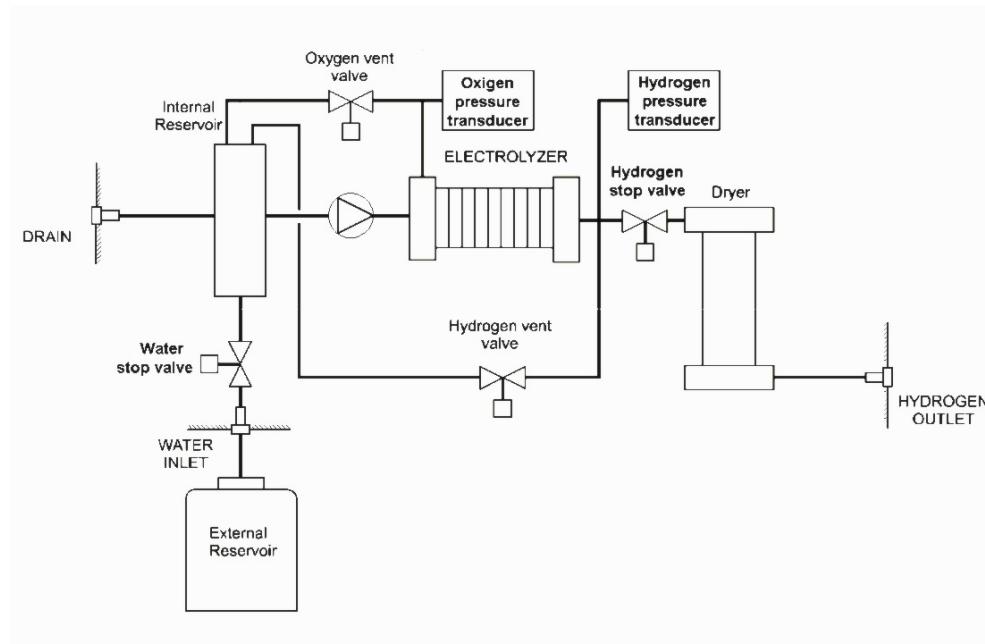


FIGURE 4.18 – Claind GH 2400

2. Le système *BAMAG* de *i.h.t.* permet d'avoir un rendement approximatif de 71% ~ 77%. [S23]

Ces différents instruments participent à la consommation excessive de notre installation. Comme il n'est pas possible d'ouvrir l'appareil, pour l'instant³, nous ne pouvons pas identifier les éléments les plus énergivores ni les remplacer par des instruments plus économies.

Il faut noter que cet appareil a été choisi pour son coût, son faible encombrement et dans le but de démontrer la faisabilité d'une production d'hydrogène locale. Pour un meilleur rendement et une utilisation intensive, il est nécessaire d'utiliser un électrolyseur de grande capacité. Ce type d'appareil permet une grande production en un temps moindre. Il serait, en théorie, possible de remplir 23 bonbonnes de 72 litres à 200 bars en une heure⁴.

Dans le cadre de notre laboratoire, il est question de remplir une bonbonne de 72 litres à 200 bars, dans le but d'alimenter le bateau *Hydroxy 3000*. Ce bateau permet l'étude des piles à combustibles dans des conditions réelles d'utilisation et de promouvoir ce type de propulsion. Pour les besoins de notre étude, afin d'obtenir des résultats de mesure plus rapidement, nous avons décidé de remplir une bouteille de 10 litres à 200 bars.

3. Clauses de garantie

4. Ce calcul a été fait à partir de la fiche technique du système *BAMAG* de *i.h.t.*[S23]

4.7.2 Surpresseur Haskel AGT 7/30

Pour les besoins de l'expérience, nous avons utilisé une bonbonne de 10 litres qui supporte des pressions allant jusqu'à 200 bars. Suite à quelques mesures, nous avons constaté que les pertes (fuites) dans le surpresseur étaient très élevées. Nous avons donc commandé une révision totale des joints. Les résultats présentés ont été obtenus après la révision du surpresseur et le remplacement des joints d'étanchéité.

Pertes (proportion)

Le surpresseur *Haskel AGT 7/30* compresse l'hydrogène produit. Après deux mois de mesures, nous avons remarqué que les fuites lors de la compression sont supérieurs à nos attentes, malgré la révision complète des joints⁵.

Le graphique 4.19 représente le pourcentage de l'hydrogène produit qui est perdu en fonction de la pression. Il est visible sur le graphique que les pertes augmentent avec la pression. La tendance est linéaire avec l'augmentation de la pression. À 172 bars, il est estimé que 75 % de l'hydrogène produit est perdu.

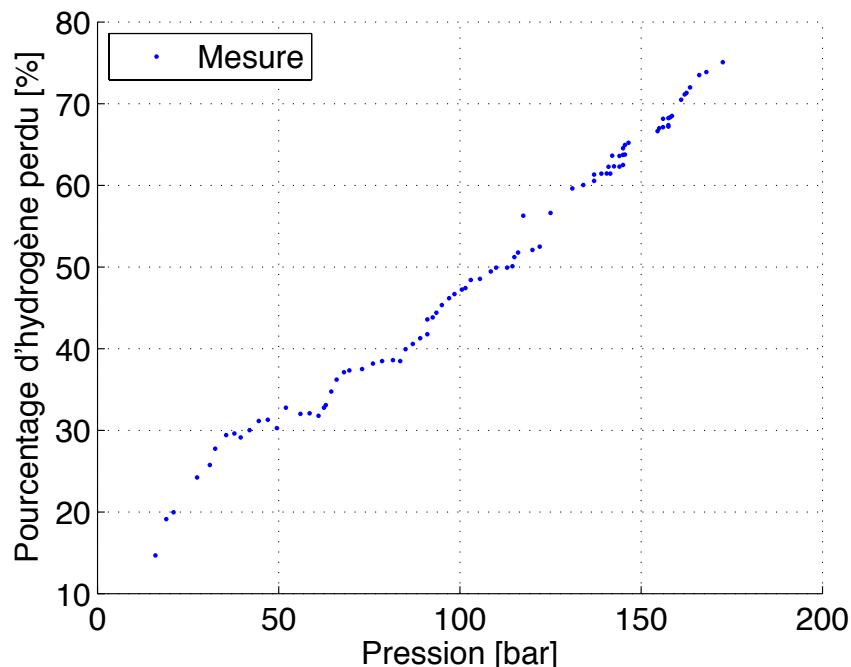


FIGURE 4.19 – Part de l'hydrogène perdue lors de la compression

5. Rappelons que le débit d'entrée nominal du surpresseur est 10 à 20 fois plus élevé que le régime dans lequel nous l'utilisons

Fuites (débit)

Le graphique 4.20 illustre les fuites en fonction de la pression de sortie. Le flux d'hydrogène entrant dans le surpresseur et la pression motrice étant constant, on peut supposer que les pertes ont lieu lors de la compression et sont dues à la pression en sortie. Par conséquent, on peut supposer que pour une pression de sortie donnée, on aura un débit de fuite déterminé. En augmentant le débit de l'électrolyseur, les fuites resteraient au même niveaux. Par contre, avec l'augmentation du débit entrant, la proportion d'hydrogène perdue devrait diminuer.

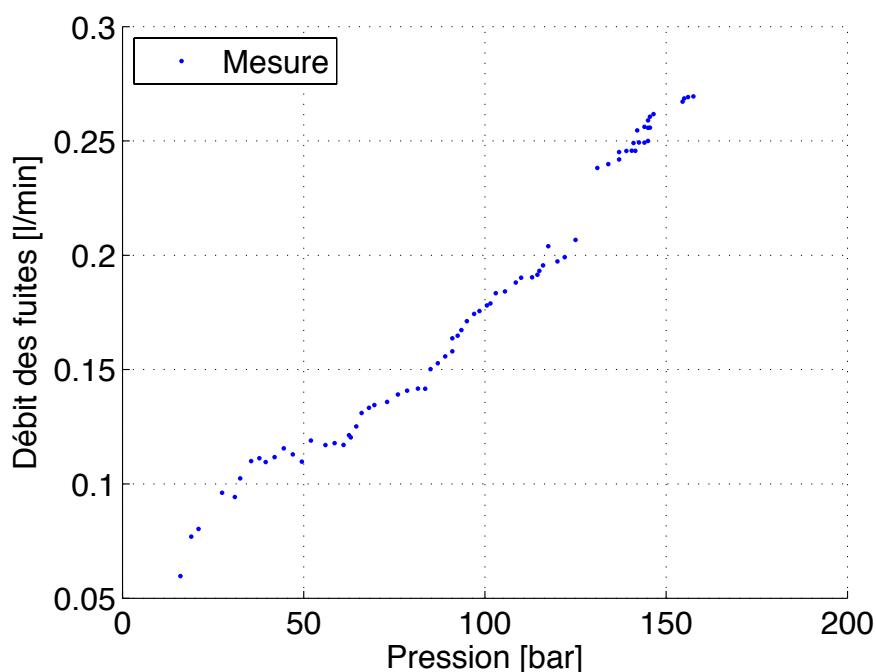


FIGURE 4.20 – Fuites lors de la compression

Pression

Le graphique 4.21 montre la différence entre la pression mesurée sur le manomètre de la bonbonne et la pression que nous aurions obtenu théoriquement dans le cas de perte nulle. Nous observons que les deux pressions divergent assez rapidement avec l'augmentation de la pression.

La technologie des joints, utilisée par le surpresseur *Haskel AGT 7/30*, n'est visiblement pas adaptée à une faible production. Les fuites sont beaucoup trop importantes par rapport à notre production d'hydrogène. Une technologie

différente peut avoir de meilleur résultat. Les compresseurs à membrane sont peut être une solution envisageable pour résoudre le problème de fuites.

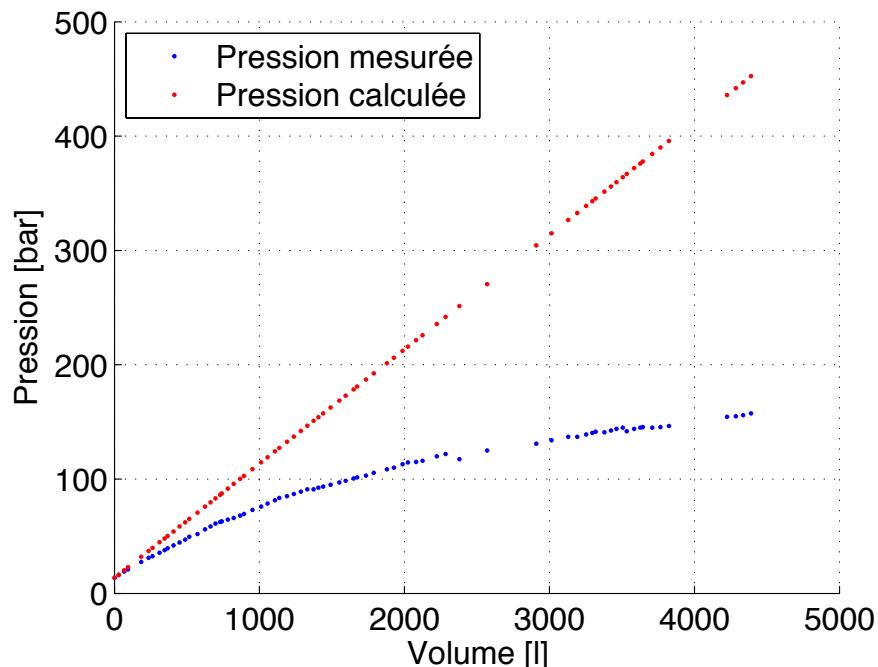


FIGURE 4.21 – Pression mesurée et pression calculée

Compresseur à membrane

La compression par membrane permet une compression sans fuite. Le principe de ce type de compresseur repose sur la flexion d'une membrane qui assure la compression du gaz. Il est possible d'obtenir une pression de sortie de 400 bars avec deux étages de compression.

Nous listons ci-dessous les avantages et inconvénients de ce type de compresseur :

Avantages

- Gaz non pollué.
- Pas de fuite.
- Utilisable avec tous les gaz.
- Pression de sortie très élevée.
- Le rendement énergétique est bien meilleur.
- La maintenance réduite.

Inconvénient

- Prix élevé.
- Non disponible pour les quantités du projet.

Plus d'informations sont disponibles dans l'étude de la HE-Arc [8].

4.7.3 Rendement total de notre installation de production d'hydrogène

En reprenant la formule 4.5, p. 22, nous pouvons calculer le rendement total de l'installation. Nous avons déterminé par mesure que le rendement de l'électrolyseur est de 42%. La source d'énergie du surpresseur est l'air comprimé fourni par le réseau de l'école. Afin de calculer l'énergie consommée en air comprimé, nous devons connaître l'énergie consommée par unité de volume par le compresseur de l'école ainsi que le volume consommé par le surpresseur par cycle.

Le compresseur de la HEIG-VD est un *AtlasCopco* modèle SF 15 FF-10. Celui-ci débite 22.6 [l/s] d'air comprimé à 6 bars pour une puissance totale de l'installation est de 18.1 [kW].

La durée moyenne d'un cycle de compression est de 1 [s], dans ce laps de temps le compresseur *AtlasCopco* consomme une énergie équivalent à 0.005 [kWh] et produit 22.6 [l] d'air comprimé à une pression de 6 [bars], soit 135.6 [nl].

Le volume de la chambre d'air comprimé dans le surpresseur *Haskel* est de 4.3 [l], lors d'un cycle de compression la chambre est remplie à deux reprises⁶. Le surpresseur consomme 8.6 [l] d'air comprimé à des pressions motrices de 4 [bars], 5 [bars] et 6 [bars] ce qui correspond, respectivement, à un volume de 34.4 [nl], 43 [nl] et 51.6 [nl]. Nous pouvons donc déterminer l'énergie consommée par le surpresseur en faisant le rapport entre le volume d'air comprimé consommé et le volume fournit par l'école :

$$E_{surpresseur} \quad [kWh] = \frac{Air_{cons.} \quad [l]}{Air_{fourni} \quad [l]} \cdot E_{compresseur} \quad [kWh] \quad (4.12)$$

Selon la fiche technique du surpresseur, le volume d'hydrogène comprimé par cycle est de 0.216 [l] à une pression de 3 bars, ce qui fait 0.648 [nl]. À ce volume, nous retranchons les pertes du surpresseur. Avec ce volume, nous pouvons déterminer le nombre de moles d'hydrogène comprimées :

$$Mol_{H_2} \quad [mol] = \frac{Volume_{H_2} \quad [l]}{Volume_{molaire} \quad [l/mol]} \quad (4.13)$$

En sachant que $E_{M_{H_2}}$ vaut 0.08 [kWh/mol] et que le rendement de l'électrolyseur est de 42 [%], il est maintenant possible de calculer le rendement avec la formule suivante :

6. la première fois pour le piston à basse pression et la seconde fois pour le piston à haute pression

$$\eta = \frac{E_{M_{H_2}} \cdot \text{Mol}_{H_2\text{stockées}}}{\frac{E_{M_{H_2}} \cdot \text{Mol}_{H_2\text{stockées}}}{\eta_{\text{électrolyse}}} + E_{\text{surpresseur}}} \quad [1] \quad (4.14)$$

Le graphique 4.22 présente le rendement réel auquel sont ajoutée les courbes théoriques avec et sans les pertes pour comparaison. Nous y avons aussi ajouté le graphique du rendement avec la pression motrice optimisée afin d'avoir la consommation minimale d'air comprimé. La fiche technique du surpresseur *Haskel* donne l'équation 4.15. Celle-ci permet de calculer la pression motrice nécessaire pour chaque pression de sortie.

$$P_{\text{sortie}} = 30 \cdot P_{\text{motrice}} + 4 \cdot P_{\text{entrée}} \quad (4.15)$$

Le rendement réel de l'installation est inférieur de 10 % au rendement théorique adiabatique et isotherme tant que l'on reste en dessous des 110 bars.

Il diminue, après, de façon significative et passe en dessous des 20 % après 160 bars. Les deux courbes théoriques avec pertes sont supérieurs au rendement réel de 5 %, de nouveau tant que l'on reste en-dessous de 110 bars. Après avoir dépassé les 110 [%], les courbes théoriques diminuent légèrement tant que le rendement réel diminue fortement. Nous pouvons en déduire que les fuites d'hydrogène ne sont pas le seul facteur qui affectent le rendement. Il est possible que la consommation en air comprimé devient trop importante par rapport à l'énergie de l'hydrogène stocké.

Nous avons fait une simulation du rendement en optimisant la pression motrice du surpresseur. Nous voyons alors un phénomène intéressant, le rendement est supérieur à ce que la théorie prescrit. Cela est très certainement dû au fait que dans cette gamme de pression le surpresseur travaille avec la pression d'entrée de l'hydrogène et qu'il ne consomme alors pas d'air comprimé. De plus, à une pression de 200 bars, il est possible que l'hypothèse que l'hydrogène soit un gaz parfait ne soit plus valable. Après avoir passé 80 bars, le rendement, avec pression motrice optimisée, est inférieur au rendement théorique avec pertes. À partir de 150 bars, le rendement avec pression motrice optimisée rejoint le rendement réel. On peut supposer que l'optimisation de la pression motrice du surpresseur peut améliorer le rendement pour des pressions de sortie inférieures à 150 bars. Pour bénéficier de cette amélioration du rendement, la pression motrice doit être corrigée après chaque augmentation de la pression de sortie.

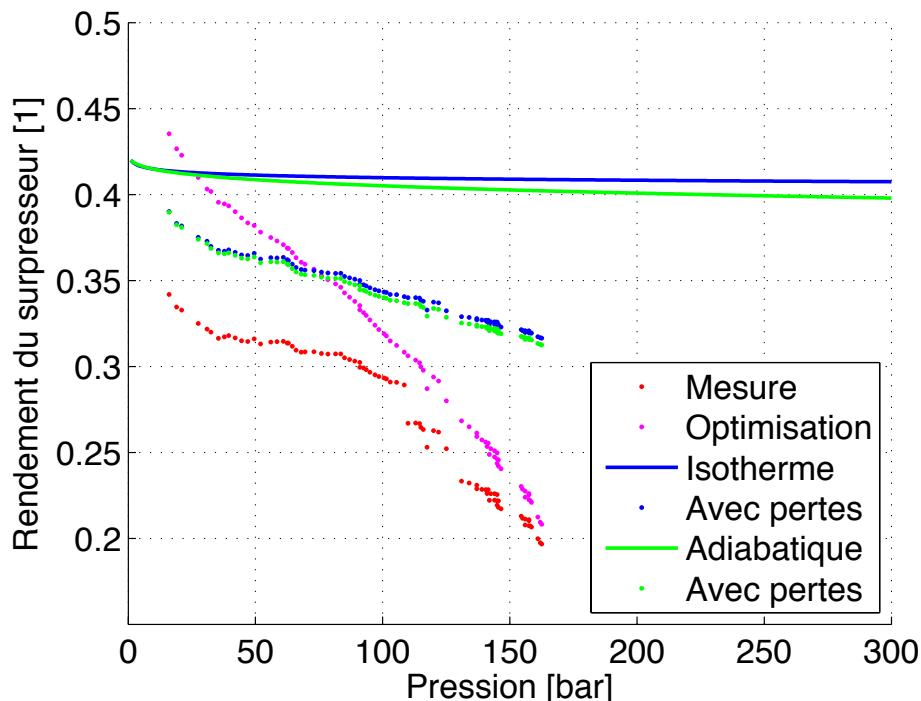


FIGURE 4.22 – Rendement global de l'installation

4.7.4 Conclusion

L'électrolyseur produit 0.4 l/min avec un rendement de 42 % conformément à la fiche technique de l'appareil. L'ajout d'une bonbonne basse pression en amont du surpresseur ainsi qu'un régulateur de pression en amont se sont avérés nécessaire pour garantir le bon fonctionnement de l'électrolyseur et du surpresseur.

Le surpresseur *Haskel* a des pertes très importante par rapport à notre production d'hydrogène. Il n'est pas avantageux et nuit fortement à notre productivité. De plus avec de tels niveaux de pertes, il va être difficile d'atteindre les 200 bars espérés. Si nous changeons notre production d'hydrogène pour un modèle à plus grand débit, alors le rapport entre les pertes du surpresseur et la production d'hydrogène sera plus favorable. Il faut, toutefois, noter que le prix, la consommation et la taille de cette d'installation est un réel problème et nécessite un grand investissement de départ.

Les mesures faites sur le surpresseur montrent, aussi, la limites des la technologie à joints. Pour une petite production les pertes sont presque du même niveau que la production. Le rendement est de l'ordre de 30 % pour une pression de sortie inférieur à 100 bars et il baisse très rapidement après. Même en

optimisant la pression motrice, le rendement réel du surpresseur reste inférieur à 30 % après 100 bars et rejoint le rendement réel à partir de 150 bars.

Avec notre production d'hydrogène actuel⁷, il serait judicieux d'utiliser un compresseur à membrane. Les fuites seraient théoriquement nulles et parce que le rendement et la pression de sortie seront plus élevés.

Pour une production de masse, une installation de type *BAMAG* de *i.t.h.* est plus avantageuse. Elle permet de produire 330'000 nl/min avec un rendement entre 71% ~ 77%.[\[S23\]](#)

7. Débit d'hydrogène de 0.4 [nl/m] à 3 bars

5 Prix de revient de l'H₂

Afin de simplifier les comparaisons, le prix de revient de l'hydrogène sera indiqué en CHF/Nm³.

5.1 Prix de revient de l'H₂ produit à la HEIG-VD

L'énergie nécessaire à la production de l'hydrogène est produite à l'aide d'une mini-centrale solaire de 800 W_p, ainsi qu'une éolienne d'une puissance nominale de 600 W.

Hypothèses : Le rendement du compresseur à air comprimé sera considéré de 65 % et le rendement du surpresseur sera aussi considéré de 65 %.

Les caractéristiques de l'électrolyseur HG 2400 sont les suivantes :

Débit : 0.4 litre/min
P électrique : 175 W

Les coûts fixes sont les suivants :

Coût de la centrale PV :	10'900	CHF
Coût de l'éolienne :	5'250	CHF
Coût de l'électrolyseur :	8'730	CHF
Coût du surpresseur :	8'820	CHF
Coût de la tuyauterie :	1'000	CHF

Les coûts variables sont les suivants :

Remplacement du dessiccatif tous les 20'000 l :	100	CHF
Révision générale toutes les 10'000 heures :	2'000	CHF

L'énergie consommée par l'électrolyseur pour produire 1 Nm³ est :

$$E_{electrolyse} = \frac{P_{el}}{\text{Debit} \cdot 60} = 7.08 \quad [kWh] \quad (5.1)$$

L'énergie nécessaire à la compression de 1 Nm³ de 1 à 200 bars s'obtient à l'aide de l'équation 4.2 divisé par les rendements du compresseur à air comprimé et du surpresseur :

$$E_{compression} = 0.63 \quad [kWh] \quad (5.2)$$

L'énergie totale nécessaire pour produire 1 Nm³ est donc :

$$E_{tot} = 7.71 \quad [kWh] \quad (5.3)$$

En posant comme hypothèse que la centrale solaire produit environ 800 kWh par année, il peut en être déduit que, pour ne pas dépasser l'énergie produite, environ 100 Nm³ de H₂ pourrait être produit par année. Ceci représenterait 4'200 heures de fonctionnement annuel.

En rentabilisant l'installation de production en 20 ans et en la faisant travailler 4'200 heures par année, 2'000 Nm³ seraient produits. Il faudrait donc changer 100 fois le dessiccateur et faire 8 révisions générales.

Le coût total de l'installation s'élèverait donc à 61'000 CHF.

Le prix de revient de l'hydrogène produit à la HEIG-VD serait donc de 30.27 CHF/Nm³, soit 10.09 CHF/kWh.

5.2 Prix de revient de l'H₂ fourni par Carbagas

Le prix de l'hydrogène fourni par Carbagas dépend du volume annuel consommé :

Consommation annuelle	Mode d'approvisionnement	Prix
1'000 à 25'000 Nm ³	Cadres de bouteilles	4.50 - 3.00 CHF/Nm ³
25'000 à 100'000 Nm ³	Transfert de pression	2.20 - 1.70 CHF/Nm ³
100'000 à 500'000 Nm ³	Trailers semi-remorque	1.70 - 1.10 CHF/Nm ³

TABLE 5.1 – Prix de l'H₂ fourni par Carbagas

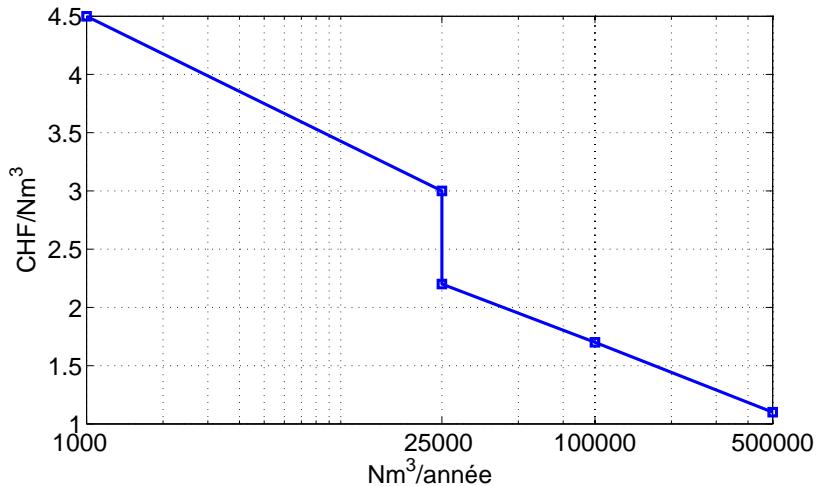


FIGURE 5.1 – Prix de l'H₂ fourni par Carbagas en fonction du volume consommé

Le prix de l'hydrogène fourni par Carbagas est particulièrement bas par rapport à celui qui va être fabriqué à la HEIG-VD. Ceci est dû au fait que l'hydrogène fourni par Carbagas est fabriqué par vaporeformage à partir d'hydrocarbures et à des quantités « industrielles ».

5.3 Comparaison avec l'essence

Un mètre cube d'hydrogène normalisé d'hydrogène contient 3 kWh, un litre d'essence contient 9.6 kWh. L'hydrogène peut être consommé dans une pile à combustible ayant un rendement de 50 % suivit d'une électronique ayant une rendement de 95 % et d'un moteur ayant aussi un rendement de 95 %. Au final 1 kWh mécanique consomme 2.21 kWh d'hydrogène, soit 738 litres normalisé. En considérant un mètre cube normalisé à 4.50 CHF⁸, 1 kWh mécanique coûte donc 3.32 CHF. L'essence, quant à elle, peut fournir directement de l'énergie mécanique par le biais d'un moteur à combustion interne, dont le rendement se situe souvent entre 15 et 25 %. En considérant le prix de l'essence à 2 CHF/litre et un moteur ayant un rendement de 10 %, 1 kWh mécanique consomme 0.9 litre et coûte donc 1.82 CHF. Dans ce cas de figure la propulsion à l'hydrogène coûte 1.82 fois plus chère que celle à l'essence. Dans ces conditions, il faudrait que l'essence coûte 3.66 CHF/litre pour que l'hydrogène soit financièrement rentable. Pour que le prix de l'hydrogène devienne plus intéressant que l'essence, il faudrait que son prix de revient soit de 2.46 CHF/Nm³, soit une consommation plus élevée que 25'000 m³ par an. Pour arriver à une telle consommation, il faudrait plus de 500 bateaux de plaisance. Etant donné qu'il n'y a guère plus que 13'000 bateaux à moteur entre le lac Léman et le lac de Neuchâtel [S24], il est très peu probable que 500 bateaux viennent se ravitailler au même endroit. De ce fait l'hydrogène reste non concurrentiel financièrement avec l'essence. Malgré cela l'hydrogène offre des avantages non négligeables qui valent bien le payer un peu plus ; *pas de vibrations, d'odeurs, de pollution de l'eau et surtout une propulsion silencieuse.*

8. Prix de vente de Carbagas pour notre consommation d'hydrogène

6 Conclusion

6.1 Dimensionnement d'une installation de production pour un port

D'après l'étude mené dans le cadre du projet H₂ports, nous estimons que quatre modes d'approvisionnement en hydrogène sont possibles pour un port, voir tableau 3.1 p.15. Le choix d'un mode d'approvisionnement se fait en fonction de la consommation et du nombre de bateau se propulsant avec grâce à l'hydrogène. Selon cette même étude, pour qu'une production sur place soit rentable, il est nécessaire que 745 bateaux d'une puissance de 10 kW⁹ s'approvisionnent dans le même port. Dans le cas d'une flotte plus modeste de vingt navires du même types que l'Hydroxy 3000¹⁰ de la HEIG-VD, la figure 3.3 p.16 et le tableau 3.1 p.15 montrent que l'approvisionnement se ferait par cadres de bouteilles.

6.2 Installation de production à la HEIG-VD

Dans le cadre du projet H₂Ports, la chaîne de production est composée d'une production d'hydrogène par électrolyse, un stockage gazeux dans des bonbonnes à 200 bars et d'une distribution de type station de remplissage, voir figure 4.2 p.19.

Nous estimons les besoins en hydrogène du bateau Hydroxy 3000 à **120 Nm³** par année. L'électrolyseur doit, par conséquent, produire **40 litres par heure**¹¹. Nous estimons, aussi, que tous sera consommé en trois mois, il est nécessaire de pouvoir stocker au moins 90 m³. Le stockage se fera par bonbonnes à 200 bars, c'est la solution la plus pratique et la moins onéreuse. Elle implique l'usage d'un compresseur.

La théorie des gaz parfaits prévoit que la compression à une pression de 200 bars consomme 11 % de l'énergie de l'hydrogène, voir chapitre 4.3.3. Elle prédit aussi un rendement global entre 73 % et 76 %, selon que la compression se passe en régime isotherme ou adiabatique. De plus, la théorie des gaz de Van der Waals¹² prédit un rendement du même ordre celui des gaz parfait.

9. Pour garantir une vitesse de croisière d'environ 15 km/h (8 noeuds), il faut une puissance de 10 kW.

10. Bateau propulsé par une pile à combustible de 3 kW.

11. Nous considérons qu'il travaillera 10 mois par an à raison de 10 par jour.

12. Cas isotherme

6.3 Matériel

Électrolyseur

Au vu de la plage de production qui nous intéresse, notre choix s'est porté sur un électrolyseur de laboratoire. Les qualités itinérante à chaque appareil étant équivalentes, notre choix s'est porté sur l'électrolyseur *Claind HG 2400*. Il faut noter que le rendement de ce type d'électrolyseur est inférieur à celui d'un appareil de production industrielle. Il a été mesuré que le rendement ne dépassait pas les 42 %.

Compresseur

Le choix de compresseur pour la gamme de pression et les quantités souhaitées est quasiment inexistant. L'étude mené par la HE-Arc [8] ayant pris du retard nous nous sommes rabattus sur le surpresseur *Haskel AGT 7/30* en raison de son rapport de compression sa disponibilité, son coût et les délais de livraison.

Bonbonne

Nous avons sélectionné les bonbonnes *Dynetek* pour le stockage d'hydrogène. Elle supporte de grande pression et ont un grand volume. De plus, elles sont utilisables sur l'*Hydorxy 3000*.

6.4 Partie expérimentale

Électrolyseur

Le rendement de l'électrolyseur *Claind HG 2400* est de 42 %. Il est moitié moins grand que le rendement d'un électrolyseur *industriel*. Étant un appareil destiné à du travail de laboratoire, il n'a, sans doute, pas été optimisé pour avoir un rendement maximal.

Surpresseur

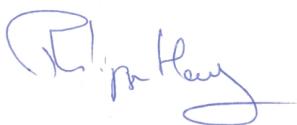
Les pertes mesurées sur le surpresseur *Haskel AGT 7/30* sont importantes. Elles montrent la limite de la technologie des compresseur à joint. Le rendement global de l'installation est inférieur à 35 % pour des pressions en dessous de 100 bars et il descend sous les 20 % pour des pressions au dessus de 150 bars. Le développement d'un nouveau compresseur serait judicieux.

6.5 Prix de revient de l'H₂

Nous estimons le coût total de l'installation à 61'000 CHF¹³. L'installation devrait être rentabiliser en 20 ans sous la condition de travailler 4'200 heures par année. Dans ce cas le prix de revient de l'hydrogène produit serait de 30.27 CHF/m³, soit 10.09 CHF/kWh.

Le prix de l'hydrogène est 6.7 fois plus chère que celui fourni par Carbagas. Cette société fabrique sont hydrogène à partir d'hydrocarbures par vaporeformage ce qui explique le faible prix de l'hydrogène. Toutefois, ce procédé de fabrication d'hydrogène à l'énorme inconvénient de produire d'énormes quantités de CO₂.

Yverdon-les-Bains, le 11 février 2010.



Philippe Morey



Sergio Daniel Marques Dos Santos

13. Nous tenons compte du prix de la centrale Photovoltaïque (10'900 CHF) et de la centrale éolienne (5'250CHF) qui sont déjà présentes sur le site de la HEIG-VD

Bibliographie

- [1] R.D. McCarty, L.A. Weber, *Thermophysical Properties of Parahydrogen from Freezing Liquid Line to 5000 R for Pressures to 10'000 Psia* U.S. Department of Commerce & National Bureau of Standards, April 1972.
- [2] R.D. McCarty, *Hydrogen Technological Survey- Thermophysical Properties*, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1975.
- [3] R.D. McCarty, J. Hord, H.M. Roder, *Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)*, U.S. Department of Commerce & National Bureau of Standards, February 1981.
- [4] J.P. Jonchère, *Production d'hydrogène à partir des combustible fossiles*, Mémento de l'Hydrogène, Fiche 3.1.1, octobre 2003.
- [5] Kh. Nasrifar, O. Bolland, *Prediction of thermodynamic properties of natural gaz mixtures using 10 equation of state including a new cubic two-constant equation of state*, Journal of Petroleum Science & Engineering, Vol. 51 p. 253-266, January 2006.
- [6] R.T. Jacobsen, J.W. Leachman, S.G. Penoncello, E.W. Lemmon, *Current Status of Thermodynamic Properties of Hydrogen*, Int. J. Thermophys., August 2007.
- [7] Dreyer Yannick, *Étude de production compression et stockage d'hydrogène*, Travail de diplôme HE-Arc, 2008-2009.
- [8] Varidel Christophe, Thierry Robert, *H₂Ports Compression de l'hydrogène* HE-Arc, 19 janvier 2009.

Webographie

- [S1] www.global-hydrogen-bus-platform.com, *CUTE* (Des transports propres pour l'Europe), Projet financé par la communauté européenne pour étudier des bus alimentés par des piles à combustible.
- [S2] www.wikipedia.com, Encyclopédie en ligne.
- [S3] www.sagim-gip.com Fabricant de matériel de production d'hydrogène.
- [S4] solar.web.psi.ch/data/research/elprod, Paul Scherrer Institut.
- [S5] www.sciencedirect.com, Science direct.
- [S6] www.solarpaces.org
- [S7] www.scehardt.com/photos
- [S8] www.airproducts.com, Fabriquant de station à hydrogène, commerçant de gaz.
- [S9] www.h2logic.com, Fabricant de station à hydrogène revendeur Ovonic.
- [S10] www.carbagas.ch, Commerçant de gaz.

- [S11] webbook.nist.gov National Institute of Standards and Technology
- [S12] www.claind.it, Fabricant d'électrolyseur.
- [S13] www.protonenergy.com, Fabricant d'électrolyseur.
- [S14] www.electrichydrogen.com, Fabricant d'électrolyseur.
- [S15] www.heliocentris.com, Fabricant d'électrolyseur.
- [S16] www.accagen.com, Fabricant d'électrolyseur.
- [S17] www.myphill.com, Fabricant de compresseurs.
- [S18] www.hydropac.com, Fabricant de compresseurs à hydrogène.
- [S19] www.maximator.de, Fabricant de surpresseurs pour hydrogène.
- [S20] www.haskel.fr, Fabricant d'appareil à haute pression hydraulique et gaz jusqu'à 10'000bar.
- [S21] www.dynetek.com, Commerçant de bonbonnes.
- [S22] www.ovonic-hydrogen.com, Fabricant de bonbonnes à hydrures métalliques.
- [S23] www.iht.ch *i h t* Industrie Haute Technologie, clean hydrogen solutions.
- [S24] www.bfs.admin.ch, Office fédéral de la statistique.

A Enquête menée dans le cadre du projet « H₂Ports »

Synthèse des résultats de l'Enquête menée dans le cadre du projet « H2Ports » Hydrogène dans les ports

Professeurs : Jean-François Affolter et François Gaille
Ingénieur de projet : Christophe Pollet
29 janvier 2009, version v2

Institut IESE, HEIG-VD
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
hydroxy@heig-vd.ch

1. Introduction et rappel des buts de l'enquête

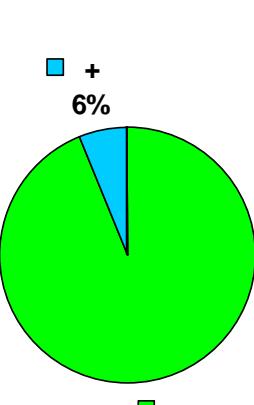
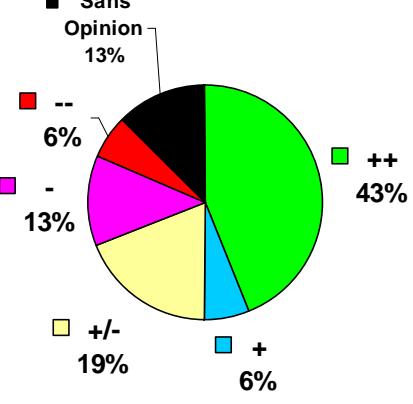
Dans le cadre du projet H2PORTS, une enquête (voir annexe) a été envoyée en octobre 2008 à différentes instances (industries, associations, communes, chantiers navals, ports,...) concernées par une mobilité lacustre basée sur de nouvelles énergies « douces » telles que la propulsion de bateaux à l'aide de piles à combustible (PAC) fonctionnant à l'hydrogène ou plus généralement par l'éco-mobilité. Le but : évaluer leur intérêt à ce que l'hydrogène devienne une source d'énergie quant à la propulsion de bateaux sur les lacs suisses.

Cette enquête, envoyée à 110 instances réparties sur tout le territoire suisse, comportait 13 questions relatives au thème de l'éco-mobilité. Pour chacune des questions posées, cinq réponses étaient proposées, à savoir :

- ++ : en parfait accord avec la proposition
- + : en bon accord avec la proposition
- +- : en accord partiel avec la proposition
- : en désaccord partiel avec la proposition
- : en total désaccord avec la proposition.

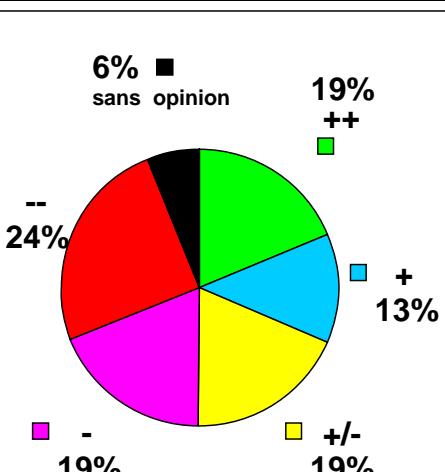
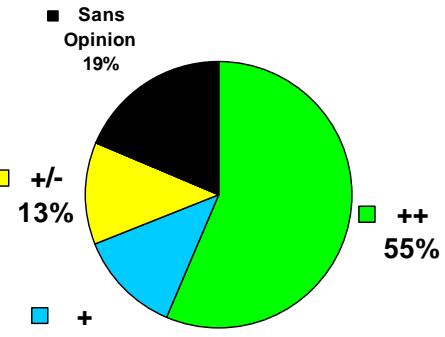
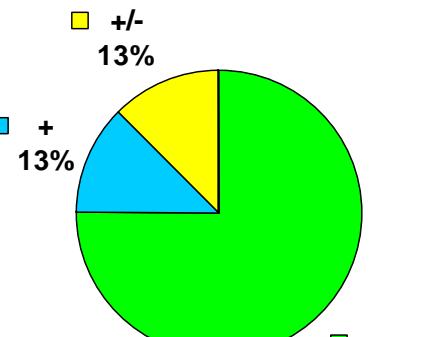
Parfois, certaine question nécessitait une réponse préalable du type oui / non ; dans ce cas, le type de réponse donné est précisé. Sur les 110 envois, 16 questionnaires remplis sont parvenus en retour, soit environ 15%, ce qui tout à fait convenable pour ce genre d'enquête.

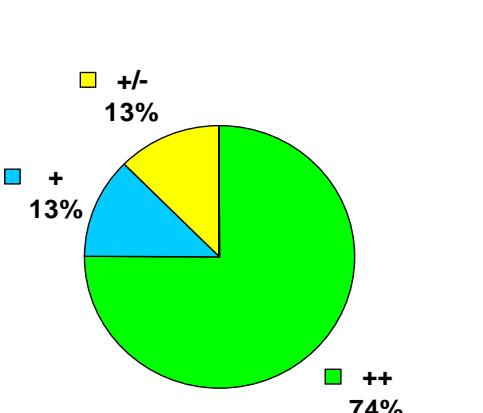
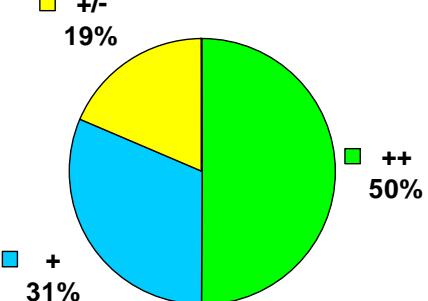
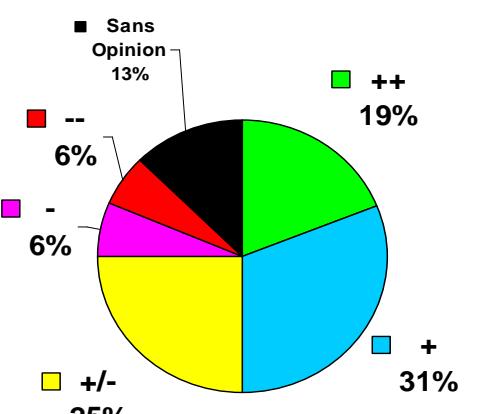
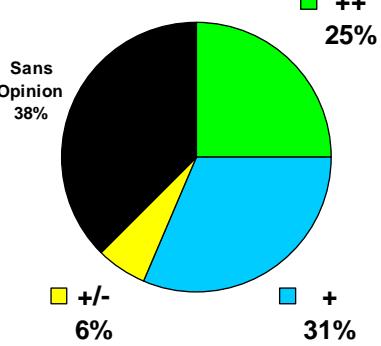
2. Résultats aux 13 questions sous forme de graphiques

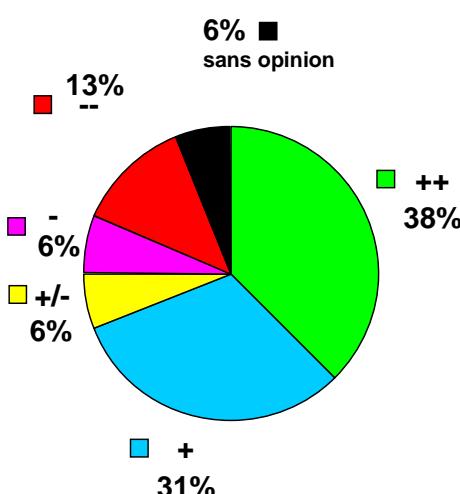
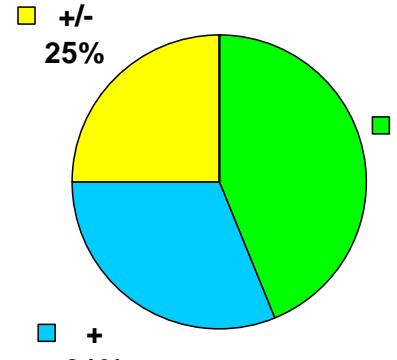
Q1 : La protection des eaux et des lacs est-elle importante ?	Q2 : les bateaux avec une motorisation thermique classique contribuent beaucoup à la pollution ?																
 <table border="1"> <tr> <td>++</td> <td>94%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>6%</td> </tr> </table>	++	94%	+	6%	 <table border="1"> <tr> <td>Sans Opinion</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>+-</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>++</td> <td>43%</td> </tr> </table>	Sans Opinion	13%	--	6%	-	13%	+-	19%	+	6%	++	43%
++	94%																
+	6%																
Sans Opinion	13%																
--	6%																
-	13%																
+-	19%																
+	6%																
++	43%																

Grande majorité de ++, résultat explicite, la protection des eaux est une nécessité

Les 2/3 pensent que la motorisation thermique classique est source de pollution

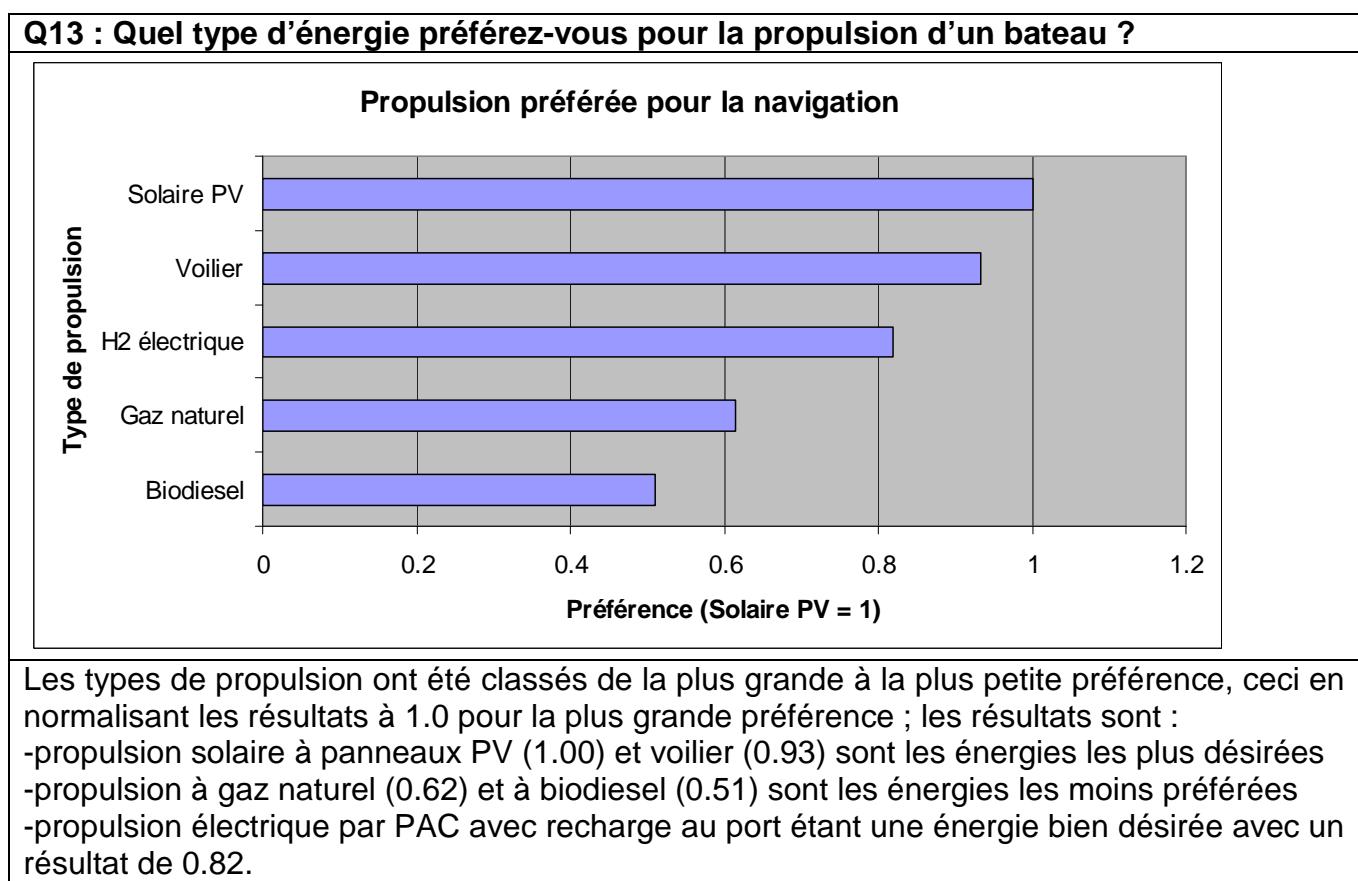
<p>Q3 : Constatez-vous beaucoup de fuites lors du remplissage du carburant thermique ?</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>+/-(yellow)</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>-- (red)</td> <td>24%</td> </tr> <tr> <td>sans opinion (black)</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>++ (green)</td> <td>19%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	-	19%	+/-(yellow)	19%	+	13%	-- (red)	24%	sans opinion (black)	6%	++ (green)	19%	<p>Q4 : Avez-vous déjà essayé un bateau alimenté par énergie électrique ? Si oui, l'expérience vous a-t-elle plu ?</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>+/-(yellow)</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>Sans Opinion (black)</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>++ (green)</td> <td>55%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	+	13%	+/-(yellow)	13%	Sans Opinion (black)	19%	++ (green)	55%
Réponse	Pourcentage																								
-	19%																								
+/-(yellow)	19%																								
+	13%																								
-- (red)	24%																								
sans opinion (black)	6%																								
++ (green)	19%																								
Réponse	Pourcentage																								
+	13%																								
+/-(yellow)	13%																								
Sans Opinion (black)	19%																								
++ (green)	55%																								
<p>Environ 50% constatent des fuites et 50% n'en constatent presque pas</p>	<p>Sur 16 réponses : 13 oui, 3 non Les 2/3 des répondants ayant essayé un bateau mû par énergie électrique (PAC ou autre) sont satisfaits de leur expérience</p>																								
<p>Q5 : Avez-vous entendu parler de la technologie des piles à combustible ?</p>	<p>Q6 : La diminution de la pollution acoustique est-elle un avantage important ?</p>																								
<p>Sur les 16 réponses : 15 oui, 1 seul non. Les sources d'informations :</p> <ul style="list-style-type: none"> -contacts professionnels -média (journaux, télévision,...) -conférences, congrès,... -propres travaux sur les PAC -utilisation des PAC dans d'autres contextes 	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>+/-(yellow)</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>++ (green)</td> <td>74%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	+	13%	+/-(yellow)	13%	++ (green)	74%																
Réponse	Pourcentage																								
+	13%																								
+/-(yellow)	13%																								
++ (green)	74%																								
<p>La technologie des PAC est connue par la quasi-totalité des répondants</p>	<p>La diminution du bruit (pollution sonore) représente un avantage incontesté par les répondants</p>																								

Q7 : L'absence d'odeur de combustion est-elle un avantage important ?	Q8 : La diminution de vibrations est-elle un avantage important ?																								
 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Opinion</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>74%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>13%</td> </tr> </tbody> </table>	Opinion	Pourcentage	++	74%	+	13%	+/-	13%	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Opinion</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>50%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>31%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>19%</td> </tr> </tbody> </table>	Opinion	Pourcentage	++	50%	+	31%	+/-	19%								
Opinion	Pourcentage																								
++	74%																								
+	13%																								
+/-	13%																								
Opinion	Pourcentage																								
++	50%																								
+	31%																								
+/-	19%																								
L'absence d'odeur de combustion est un avantage incontesté par les répondants	La diminution de vibrations est un avantage incontesté par les répondants																								
Q9 : Les bateaux fonctionnant à l'hydrogène sont-ils commercialisables ?	Q10 : Seriez-vous disposé à vendre des bateaux motorisés par une PAC ?																								
 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Opinion</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>31%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>Sans Opinion</td> <td>13%</td> </tr> </tbody> </table>	Opinion	Pourcentage	++	19%	+	31%	+/-	25%	-	6%	--	6%	Sans Opinion	13%	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Opinion</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>31%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>Sans Opinion</td> <td>38%</td> </tr> </tbody> </table>	Opinion	Pourcentage	++	25%	+	31%	+/-	6%	Sans Opinion	38%
Opinion	Pourcentage																								
++	19%																								
+	31%																								
+/-	25%																								
-	6%																								
--	6%																								
Sans Opinion	13%																								
Opinion	Pourcentage																								
++	25%																								
+	31%																								
+/-	6%																								
Sans Opinion	38%																								
<p>Les 3/4 des répondants pensent que les bateaux propulsés par PAC sont commercialisables ou proches de l'être.</p> <p>4 répondants pensent que les PAC pour bateaux ne sont pas encore commercialisables car :</p> <ul style="list-style-type: none"> -manque de législation -technologie trop chère -dangers (risques explosion) 	<p>Les 2/3 des répondants seraient disposés à vendre des bateaux mus par PAC, le dernier 1/3 des répondants étant sans opinion</p>																								

Q11 : Seriez-vous disposé à acheter (ou à utiliser) un bateau motorisé par une PAC ?	Q12 : Avec quelle rapidité faudrait-il remplacer la motorisation thermique classique (essence, diesel) avec une motorisation moins polluante ?																						
 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>38%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>31%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>sans opinion</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	++	38%	+	31%	+/-	6%	-	6%	--	13%	sans opinion	6%	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>++</td> <td>44%</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>31%</td> </tr> <tr> <td>+/-</td> <td>25%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	++	44%	+	31%	+/-	25%
Réponse	Pourcentage																						
++	38%																						
+	31%																						
+/-	6%																						
-	6%																						
--	13%																						
sans opinion	6%																						
Réponse	Pourcentage																						
++	44%																						
+	31%																						
+/-	25%																						

Les ¾ des répondants sont disposés à acheter ou à utiliser un bateau motorisé par une PAC, le dernier ¼ des répondants y étant opposés ou sans opinion

Les ¾ des répondants pensent qu'il faut rapidement remplacer la motorisation thermique classique par une motorisation moins polluante telle que PAC



3. Tendances observées et conclusion

- 1) Les graphiques relatifs aux questions Q1, Q2 et Q3 montrent clairement que les répondants sont préoccupés par la pollution des eaux et que les bateaux munis par un moteur thermique classique contribuent à cette pollution
- 2) Les graphiques et commentaires relatifs aux questions Q4 et Q5 montrent que la navigation avec un bateau électrique est une expérience positive et que la technologie des PAC est bien connue parmi les répondants
- 3) Les graphiques relatifs aux questions Q6, Q7 et Q8 montrent clairement que les répondants sont sensibles à une navigation douce exempte de pollution, de bruit, de vibrations et d'odeur ; en ce sens la navigation électrique mue par une PAC répond positivement et adéquatement à cette sensibilité
- 4) Les graphiques relatifs aux questions Q9, Q10 et Q11 montrent que la majorité des répondants (près des 2/3) seraient disposés à acheter ou à utiliser un bateau électrique mû par une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène celui-ci étant délivré par une station de recharge implantée les ports
- 5) Le graphique relatif à la question Q12 montre clairement que les répondants sont d'avis qu'il faut changer rapidement le type de propulsion thermique classique (essence, diesel) par une propulsion plus douce et plus écologique
- 6) Finalement, l'histogramme relatif à la question Q13 indique que :
 - a) une propulsion écologique (électrique PV et voilier) est préférée
 - b) une propulsion basée sur des carburants fossiles est non désirée
 - c) une propulsion électrique basée sur l'hydrogène est une alternative répondant aux préoccupations des répondants.

En conclusion l'étude de production d'hydrogène dans les ports, au vu d'une propulsion des bateaux électriques basé sur une pile à combustible, s'inscrit dans une démarche visant à se rapprocher d'une navigation lacustre plus respectueuse de l'environnement et plus écologique.

Annexe : Formulaire ayant servi à l'enquête menée

Enquête pour le projet « H₂Ports »

Hydrogène dans les ports

Professeur : Jean-François Affolter
Ingénieur de projet : Christophe Pollet

HES-SO / HEIG-VD
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
hydroxy@heig-vd.ch

Ce formulaire a pour but d'analyser la possibilité et l'intérêt de développer des stations de remplissage d'hydrogène pour les bateaux électriques mus par piles à combustible. La production d'hydrogène sera effectuée au moyen d'énergies renouvelables.

Ce sondage est réalisé par l'institut d'énergie et systèmes électriques (IESE) de haute école d'ingénierie et de gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) dans le cadre d'un projet de recherche et développement soutenu par l'office fédéral suisse de l'énergie. Il s'adresse à tous les ports, chantiers navals ainsi qu'aux communes et aux associations actives dans l'éco-mobilité et la navigation.

Nous vous remercions des quelques minutes que vous prendrez pour remplir ce formulaire, et de nous le retourner par mail, poste ou fax (coordonnées en fin de document).

- Pour vous, la protection des eaux et des lacs est-elle importante ?
 - D'après vous, les bateaux avec une motorisation thermique classique contribuent beaucoup à la pollution ?
 - Constatez-vous beaucoup de fuites pendant le remplissage du carburant ?
 - Avez-vous déjà essayé un bateau alimenté par une énergie électrique ?
 - Si oui, l'expérience vous a-t-elle plu ?

++	+	+/-	-	--

++ + +/- - --

Oui Non

++	+	+/-	-	--

Si non pourquoi ?

- Avez-vous déjà entendu parler de la technologie des piles à combustible ?
 - Si oui, dans quel contexte ?

Qui Non

- La diminution de la pollution acoustique est-elle un avantage important selon vous ?
 - L'absence d'odeur (de combustion) est-elle un avantage important selon vous ?

++	+	+/-	-	--

++	+	+/-	-	--

- La diminution de vibrations est-elle un avantage important selon vous ?

++	+	+/-	-	--
<input type="text"/>				

- D'après vous, les bateaux à hydrogène sont-ils commercialisables ?

++	+	+/-	-	--
<input type="text"/>				

- Pour quelles raisons ?

.....
.....

- Seriez-vous disposé à vendre des embarcations motorisées avec une pile à combustible ?

.....
.....

- Pour quelles raisons ?

.....
.....

- Seriez-vous disposé à acheter (utiliser) des embarcations motorisées avec une pile à combustible ?

.....
.....

- Pour quelles raisons ?

.....
.....

- Comment préférez-vous les autres types d'énergies actuellement disponibles ?
(Classer par ordre d'intérêt de 1 à 5, 1 étant la plus intéressante)

- Gaz naturel
..... Voilier
..... Biodiesel
..... Solaire (panneaux photovoltaïque)
..... Purement électrique (avec recharge au port)

- Avec quelle rapidité faudrait-il remplacer la motorisation thermique classique (essence, diesel) avec une motorisation non polluante ?

(Rapide) ++ + +/ - - -- (lent)

<input type="text"/>					
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Merci de votre aide !

HES-SO / HEIG-VD
IESE / Prof. Affolter
Route de Cheseaux 1
1401 Yverdon-les-Bains

Tel. : +24 55 76 330
Fax . : +24 55 76 404

hydroxy@heig-vd.ch

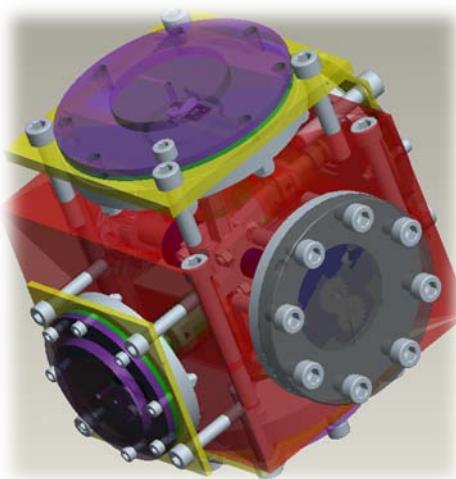
Si vous souhaitez rester informé, vous pouvez indiquer vos coordonnées ci-dessous :

.....
.....
.....

Laboratoire de Machines Thermiques et Hydrauliques

H2PORTS

Compression de l'hydrogène



N° projet SageX : 19524

Version : 1

Révision : 0

Date création : 08 janvier 2010

Dernière mise à jour : 19 janvier 2010

Mandant	Intervenant
RCSO-TE	HE-ARC ingénierie LMTH Av. de l'Hôtel-de-Ville 7 2400 Le Locle



Laboratoire de Machines
Thermiques et Hydrauliques
Av. de l'Hôtel de Ville 7
CH-2400 le Locle
Tél. +41(0) 32 930 13 54
Fax. +41(0) 32 930 14 43

www.he-arc.ch

Hes•SO
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Sommaire

1.	INTRODUCTION.....	2
1.1.	<i>Contexte du projet</i>	2
1.2.	<i>Cahier des charges</i>	2
2.	DÉVELOPPEMENT.....	2
2.1.	<i>Considérations générales sur la compression de l'hydrogène</i>	2
2.1.1.	Dangers de l'hydrogène	2
2.1.2.	Risques lors de la compression	2
2.1.3.	Densité énergétique.....	3
2.2.	<i>Types de compresseurs</i>	5
2.2.1.	Compresseur à pistons multi-étages.....	6
2.2.2.	Compresseur à membrane.....	7
2.3.	<i>Cycle thermodynamique de compression</i>	7
2.4.	<i>Développement d'un compresseur</i>	9
2.4.1.	Performances attendues.....	9
2.4.2.	Concept de base.....	9
2.4.3.	Recherche de solutions.....	10
2.4.4.	Solutions et choix retenus.....	11
2.4.5.	Calculs	12
2.4.6.	Conception	23
2.4.7.	Caractéristiques du compresseur.....	27
3.	CONCLUSION	28
4.	BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES	29

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DU PROJET

L'idée du projet est de mener une étude sur la réalisation d'une station de production d'hydrogène dans les ports. Le but est, au moyen d'énergie éolienne et solaire notamment, de produire de l'hydrogène, de le comprimer et de pouvoir le transférer sur les bateaux, directement dans le port.

1.2. CAHIER DES CHARGES

Pour cette partie du projet, il s'agit de mener une étude de faisabilité d'un compresseur pour l'application H2Ports.

D'une part, il est nécessaire d'étudier la problématique de la compression de l'hydrogène et des dangers qui y sont liés.

D'autre part, une recherche sur les types de compresseur doit être effectuée pour en déterminer le concept général le plus approprié pour cette application.

Selon les besoins du projet, les caractéristiques souhaitées sont les suivantes :

- Pression à la sortie de l'électrolyseur (entrée du compresseur) : 5 bar
- Débit de l'électrolyseur (entrée du compresseur) : 4 m³/h
- Pression à la sortie du compresseur : 300 bar

Sur la base de ces valeurs, un dimensionnement ainsi qu'une ébauche de conception doivent être effectués.

2. DÉVELOPPEMENT

2.1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA COMPRESSION DE L'HYDROGÈNE

2.1.1. DANGERS DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène possède un domaine d'inflammabilité dans l'air très large (4%-75%). Son énergie d'inflammation est environ 10 fois inférieure à celle des hydrocarbures classiques. Par contre, sa température d'auto-inflammation est plus élevée (858°K). La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et très chaude (2000°C). Malgré tout, les dangers d'une auto-inflammation ou d'une explosion restent très limités. Ceci résulte du fait que l'hydrogène a un très grand coefficient de diffusion dans l'air et que sa densité est la plus petite dans la nature. De ce fait, l'hydrogène s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement en cas de fuite. En outre, la taille de sa molécule, qui est la plus petite, lui facilite aussi la diffusion à travers les parois métalliques et à travers les parois poreuses, ce qui présente certaines difficultés dans le choix des matériaux pour son stockage et son transport, notamment.

Pour de faibles débits de fuite et en milieu non confiné, le gaz se disperse immédiatement dans l'atmosphère ; il n'y a donc pas de formation de nuage. Mais pour de plus grands débits de fuite ou en milieu confiné, une fuite peut se révéler critique et entraîner une explosion.

2.1.2. RISQUES LORS DE LA COMPRESSION

L'hydrogène pur ne pouvant être enflammé, le risque d'inflammation lié à sa compression est donc nul, quelques soient les températures atteintes à l'intérieur du compresseur. Mais si mélange air-hydrogène apparaît dans le compresseur, il est alors nécessaire d'avoir pris des mesures pour éviter l'inflammation du mélange.

La température d'auto-inflammation du mélange air-hydrogène varie en fonction de la pression. La température minimale d'auto-inflammation d'un mélange stoechiométrique est de l'ordre de 250°C pour les plus hautes pressions actuellement rencontrée (~800 bars). La température au refoulement et donc à l'intérieur du compresseur peut facilement atteindre 200°C. Toutefois, en raison des échanges thermiques lors de la compression, il semble difficile d'atteindre 250°C par le seul phénomène lors de la compression. Cependant, il faut noter que si la température à l'intérieur du compresseur peut difficilement enflammer le mélange, une étincelle le pourrait. En effet, l'énergie minimale d'inflammation du mélange air-hydrogène est très faible à pression atmosphérique et l'est encore plus lorsque la pression augmente ! Il est donc important de soigner les liaisons entre les pièces mobiles (piston-chemise, par exemple) afin d'assurer que les frottements ne produisent pas d'étincelles. Par ailleurs, il faut s'assurer que l'installation en aval du compresseur est bien reliée à la terre afin de ne pas se charger en électricité statique et ainsi éviter l'inflammation du mélange par décharge électrostatique.

Quelques causes principales d'accident de compresseurs d'hydrogène sont les listées ci-dessous :

- Fuites d'hydrogène, en raison de rupture de pièces mécaniques, fissures ou défauts d'étanchéité de canalisation, problème de dilatation entre les joints et les pièces métalliques,... ce qui risque de générer un mélange inflammable dans l'environnement du compresseur
- Surchauffe qui présente le risque d'enflammer un mélange inflammable présent dans l'environnement du compresseur
- Pénétration d'air dans les canalisations en amont du compresseur qui entraîne un risque d'inflammation au niveau des étages de compression
- Inflammation spontanée d'une fuite d'hydrogène par des points chauds lors d'une fissuration ou rupture de canalisation

2.1.3. DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'hydrogène possède un haut pouvoir énergétique, comparé aux combustibles courants (essence, méthane,...). Par contre, de part ça faible masse volumique, il a un faible pouvoir volumétrique. C'est pourquoi l'hydrogène n'est intéressant qu'à l'état liquide ou très comprimé (800 bar).

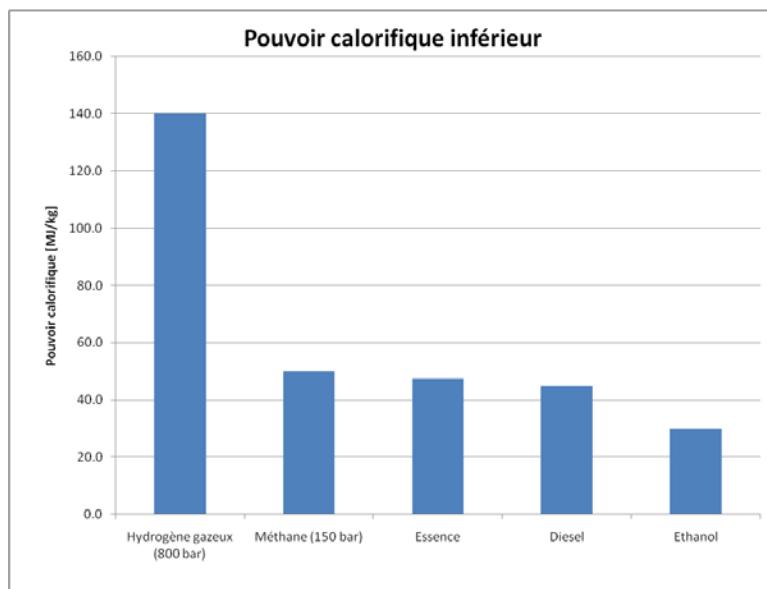


Figure 1 : Comparaison du pouvoir calorifique de quelques combustibles

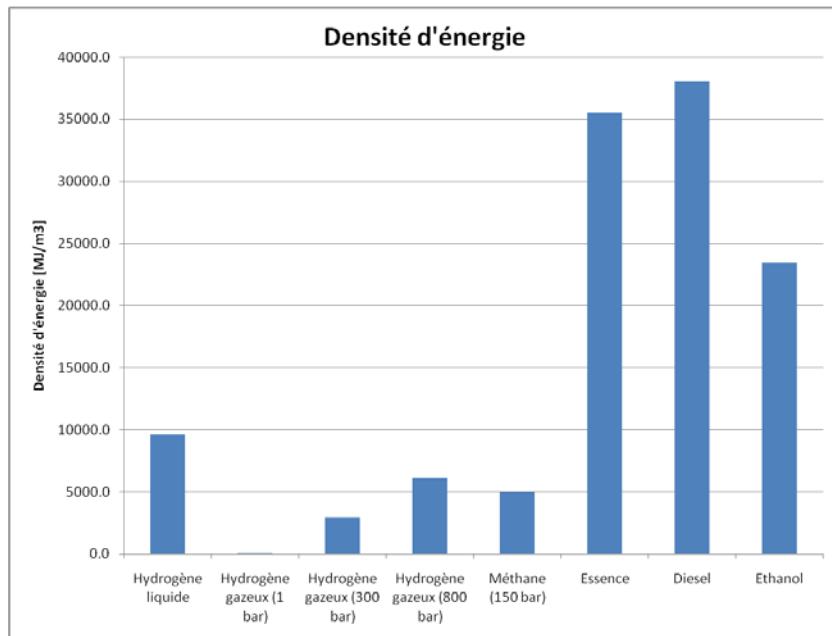


Figure 2 : Comparaison de la densité d'énergie de quelques combustibles

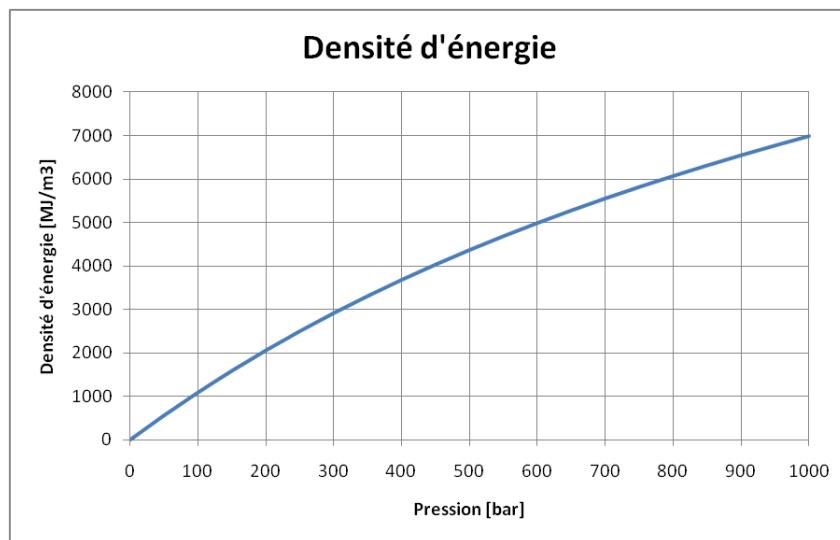


Figure 3 : Densité d'énergie de l'hydrogène gazeux en fonction de la pression

2.2. TYPES DE COMPRESSEURS

On distingue deux grandes familles de compresseurs qui s'adaptent à différentes gammes de pression :

- Les compresseurs volumétriques :
 - Compresseurs alternatifs (piston, membrane,...)
 - Compresseurs rotatifs (palettes, vis, lobes,...)
- Les compresseurs dynamiques :
 - Compresseurs centrifuges
 - Compresseurs axiaux

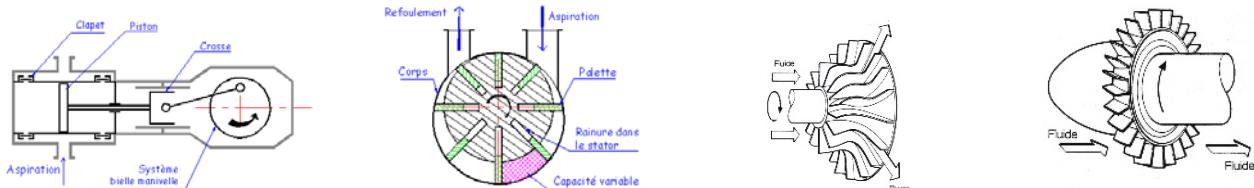


Figure 4 : Types de compresseurs (de gauche à droite : compresseur alternatif, rotatif, centrifuge et axial)

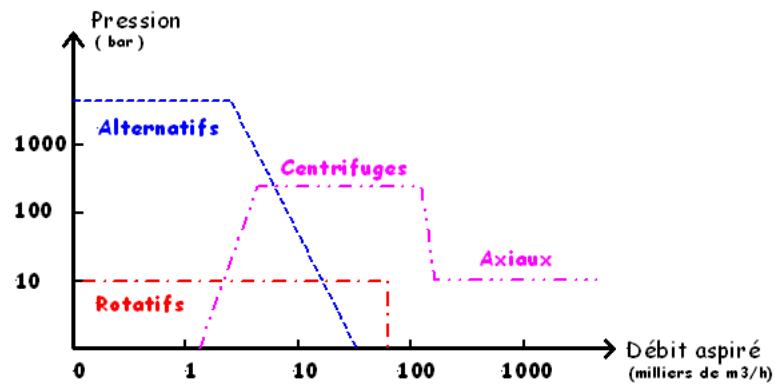


Figure 5 : Plage d'utilisation des différents types de compresseurs

La figure ci-dessus représente les plages d'utilisation de chaque type de compresseurs. Pour les hautes pressions, les compresseurs alternatifs s'avèrent les plus adaptés alors que pour les débits importants, l'avantage est aux compresseurs dynamiques.

En raison des besoins pour le projet, grâce à ce graphique, le choix se tourne vers les compresseurs alternatifs. En outre ce type de compresseurs présente de bons rendements pour des pressions élevées.

2.2.1. COMPRESSEUR À PISTONS MULTI-ÉTAGES

Le compresseur à pistons est l'un des tout premiers modèles de compresseurs mais il reste le plus polyvalent et offre généralement un bon rendement. Son fonctionnement est basé sur déplacement d'un (ou plusieurs) piston dans un cylindre mis en mouvement par un système bielle-vilebrequin.

Pour atteindre de hautes pressions, on a souvent recours à un compresseur à pistons multi-étages ; habituellement le rapport de compression par étage ne dépasse pas 4 ou 5. D'autre part, en général, la température de refoulement est limitée à 200 – 230 °C, de manière à ne pas détériorer les segments des pistons.

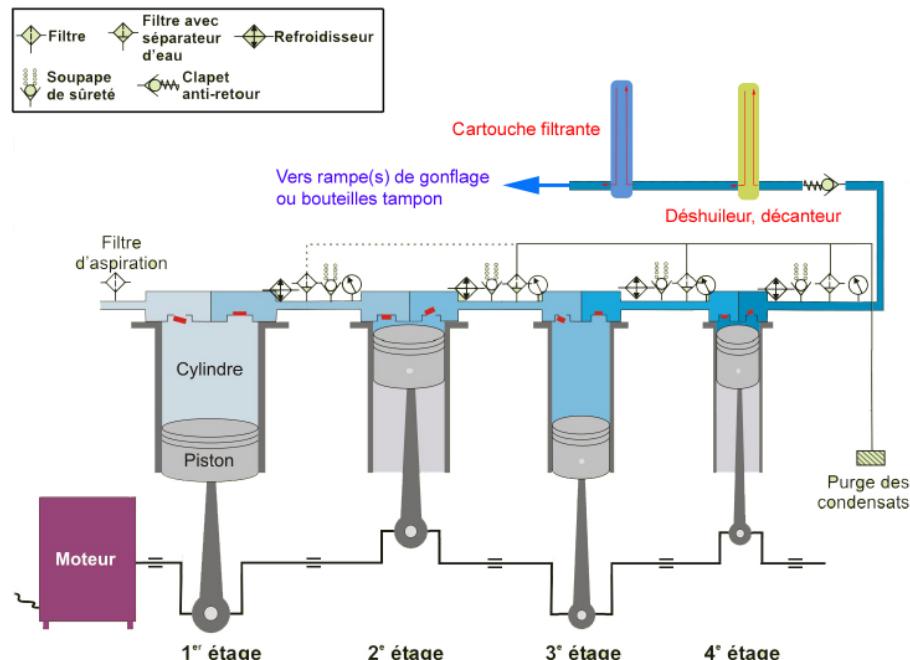


Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'un compresseur à pistons multi-étages

Il existe différents types de piston pour cette utilisation :

- Le piston simple effet, travaillant que sur une seule de ses faces
- Le piston double effet, avec une face travaillant en phase de compression alors que l'autre est en phase d'aspiration
- Le piston étagé, se déplaçant dans deux cylindres concentriques
- Le piston différentiel, fonctionnant comme un piston double effet mais sur des niveaux de pressions différents

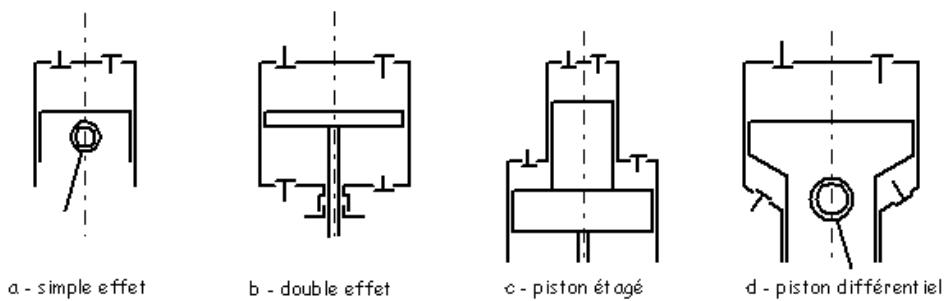


Figure 7 : Types de pistons

2.2.2. COMPRESSEUR À MEMBRANE

Une alternative au compresseur à pistons est le compresseur à membrane. C'est la déformation élastique d'une membrane (élastomère ou métallique) qui assure l'aspiration et la compression du gaz. Un système hydraulique permet d'assurer la flexion de la membrane.

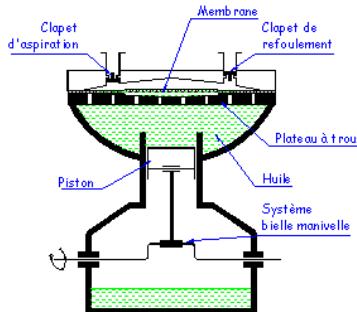


Figure 8 : Schéma de principe d'un compresseur à membrane

Un piston se déplace dans un cylindre et agit sur le fluide hydraulique qui transmettra son mouvement oscillatoire à la membrane. Le rôle du plateau à trous est d'assurer une bonne répartition du fluide sous la membrane.

La membrane assure une étanchéité statique du côté du gaz à comprimer. De ce fait, les compresseurs à membrane sont utilisés pour des gaz dangereux, corrosifs et nocifs. Le seul point négatif de ce système est son coût élevé, en comparaison d'un compresseur à pistons multi-étages.

2.3. CYCLE THERMODYNAMIQUE DE COMPRESSION

Le volume balayé par le piston est appelé la cylindrée (V_c). Le volume résiduel non balayé au-dessus du point mort haut (PMH) s'appelle le volume mort.

Le piston se trouve au PMH. Il va se déplacer vers le point mort bas (PMB - point 1). La dépression créée à l'intérieur du cylindre entraîne l'ouverture du clapet d'aspiration et, par conséquent, le fluide est aspiré. Le clapet de refoulement est fermé lorsque le piston arrive au PMB (point 1), car il ne fonctionne que dans un sens.

Le piston commence sa montée. Le fluide est compressé, car il ne peut sortir si la pression à l'intérieur du cylindre n'est pas supérieure à celle qui se trouve derrière le clapet de refoulement. Alors il se compresse pour atteindre la pression P2 (point 2). A ce moment là, le clapet de refoulement s'ouvre et la phase de refoulement s'amorce et se poursuit jusqu'au PMH (point 3). Ensuite, commence la détente du gaz emprisonné du volume mort suivant la courbe de détente isentropique où la pression P1 est atteinte (point 4). Après, un nouveau cycle recommence.

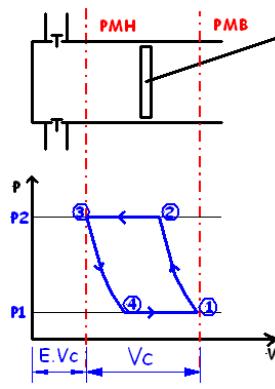


Figure 9 : Cycle de compression

On constate que le volume aspiré par cycle est :

$$V_a = V_1 - V_4 \quad \text{avec } V_1 = V_c + E * V_c$$

Le rendement volumétrique du compresseur est :

$$\eta_{vi} = \frac{V_a}{V_c}$$

La compression étant supposée polytropique, la relation est :

$$p * v^n = cst \quad \text{avec } n : \text{indice polytropique}$$

Le rendement volumétrique peut être mis sous la forme :

$$\eta_{vi} = 1 - E \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

Il en ressort que :

- η_{vi} diminue si le rapport E augmente (augmentation du volume mort)
- η_{vi} diminue si le taux de compression $\left(\frac{P_2}{P_1} \right)$ augmente

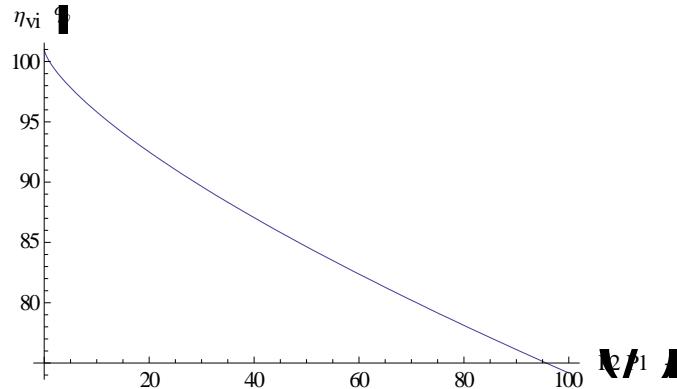


Figure 10 : Evolution du rendement volumétrique en fonction du taux de compression

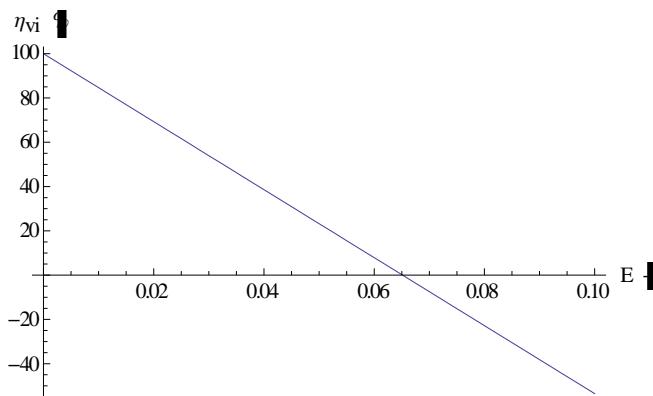


Figure 11 : Evolution du rendement volumétrique en fonction du rapport E (volume mort)

On peut en déduire deux éléments essentiels dans le fonctionnement des compresseurs :

- La variation du volume mort peut être utilisée dans la régulation de débit d'un compresseur alternatif
- Pour augmenter le rendement volumétrique, il est préférable de réaliser une compression étage. Par ailleurs, il n'est pas toujours possible d'obtenir le taux de compression souhaité en un seul étage.

2.4. DÉVELOPPEMENT D'UN COMPRESSEUR

2.4.1. PERFORMANCES ATTENDUES

Sur la base des besoins pour le projet et des caractéristiques des électrolyseurs susceptibles de correspondre à l'application voulue, les performances souhaitées sont fixées :

- Pression à l'entrée du compresseur (sortie de l'électrolyseur) : 5 bar
- Pression à la sortie du compresseur : 300 bar
- Débit à la sortie de l'électrolyseur : 4 m³/h

2.4.2. CONCEPT DE BASE

Par l'étude des différents types de compresseurs, le choix s'est porté sur un compresseur à membrane. Le gros avantage de ce système, en comparaison avec un compresseur à piston, est que l'hydrogène est complètement isolé du mécanisme ; ainsi le risque d'introduction d'impuretés (particules d'usure des éléments mobiles, par exemple) ainsi que le risque de communication avec l'huile de lubrification est très limité.

Par l'étude de l'influence du taux de compression sur le rendement volumétrique du compresseur ainsi que par observation de produits existant sur le marché, le choix se porte sur un système à quatre étages.

De manière à ne pas atteindre la température d'auto-inflammation, un système de refroidissement du gaz refoulé est envisagé, entre chaque étage.

2.4.3. RECHERCHE DE SOLUTIONS

Eléments	Possibilités	Avantages	Inconvénients
Disposition des cylindres	En ligne	Simplicité	Longueur du bloc Efforts importants (flexion, ...)
	En « V »	Pas d'équilibrage	Nombre de composants
	A plat « Boxer »	Aucune force résultante	Nombre de composants
Piston	Simple effet	Usinage	
	Etagé		Usinage
Bielle	En H ou I	Masse réduite	Coût de fabrication
	Massique	Coût de fabrication	Masse
Bloc moteur	Avec chemise	Changement en cas d'usure Précision	Montage
	Sans chemise	Montage	Changement totale en cas d'usure Usinage
Clapet	Lame à ressort	Simplicité	Rendement
	Soupape	Simplicité	Encombrement
Palier	Roulement	Lubrification simple	Encombrement
	Palier hydrostatique	Encombrement Simplicité	Nécessite de l'huile sous pression
Refroidissement	Air	Simplicité	Ventilateur Stabilité thermique Fabrication
	Eau	Simplicité Stabilité thermique	Nécessite un circuit de fluide supplémentaire
	Huile	Réservoir unique	Quantité d'huile
Lubrification	Graisse	Simplicité	Frottement Absence de contrôle
	Huile	Frottement	Nécessite un circuit de lubrification
	Traitement des surfaces	Absence de circuit de lubrification	Coût Durée de vie ?
	Barbotage	Simplicité	Lubrification réduite

2.4.4. SOLUTIONS ET CHOIX RETENUS

Eléments	Solution retenue	Raison
Type de compresseur	A membrane	Limite le risque d'un mélange air - hydrogène
Nombre de Cylindres	4	Garantir les 300 bars
Disposition	En étoile	Réduction de l'encombrement Longueur du vilebrequin réduite
Piston	Classique et étagé	Transmission des forces correctes
Bielle	En H ou I	Masse réduite Plus grand nombre de fournisseurs
Bloc moteur	Avec chemise	Solution de plus grande qualité au niveau de l'usinage et garanti une plus grande fiabilité
Clapet	Lame à ressort	Simplicité - réduction du nombre d'éléments
Palier	Hydrostatique	Système passe-partout
Refroidissement	Eau	Maîtrise de la température
Lubrification	Huile sous pression	Système le plus fréquemment utilisé dans les compresseurs
Régime de rotation	2'800 tr/min	Moteur électrique à 50 Hz

2.4.5. CALCULS

2.4.5.1. ETUDE THERMODYNAMIQUE

Selon les choix effectués, la compression se passe en quatre étages, avec un refroidissement à chaque refoulement. Au niveau du cycle de compression, il sera composé de quatre transformations polytropiques (élévation de la pression), chacune d'elle étant suivie d'une transformation isobare (refroidissement du gaz refoulé).

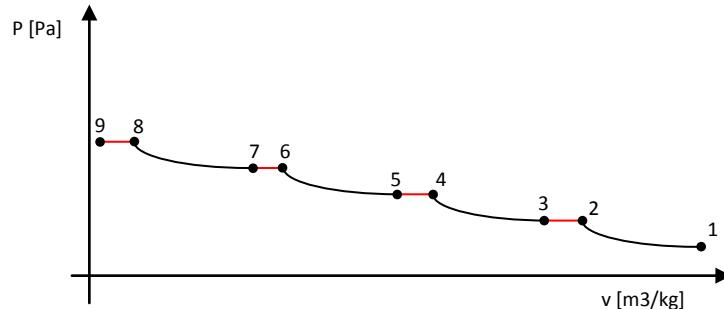


Figure 12 : Diagramme schématique de la pression en fonction du volume massique

- 1 – 2 : compression polytropique (1^{er} étage)
- 2 – 3 : refroidissement isobare
- 3 – 4 : compression polytropique (2^{ème} étage)
- 4 – 5 : refroidissement isobare
- 5 – 6 : compression polytropique (3^{ème} étage)
- 6 – 7 : refroidissement isobare
- 7 – 8 : compression polytropique (4^{ème} étage)
- 8 – 9 : refroidissement isobare

Un fichier de calcul Mathematica est ensuite élaboré, permettant de dimensionner le compresseur. Ci-après, un résumé des dimensionnements effectués est présenté. Pour le détail des calculs, il faut se référer au fichier Mathematica.

Relations principales utilisées

Equation d'état

La relation utilisée pour déterminer l'état du gaz en point donné est la suivante :

$$p v = r T$$

p [Pa] étant la pression, v [$\frac{m^3}{kg}$] étant le volume massique, T [K] étant la température et r [$\frac{J}{kgK}$] étant la constante du gaz considéré.

Cette relation est valable pour les gaz parfaits. C'est pourquoi dans le cas de l'hydrogène, gaz non-parfait, il serait nécessaire d'introduire des facteurs de correction pour améliorer le modèle.

Travail

Le travail spécifique W $\left[\frac{J}{kg}\right]$ pour chaque transformation d'un point 1 à un point 2 est déterminé par la relation suivante :

$$W_{12} = \int_{p1}^{p2} v_{12} dp$$

Variation d'enthalpie

La variation d'enthalpie ΔH $\left[\frac{J}{kg}\right]$ pour chaque transformation (d'un point 1 à un point 2) est déterminée par la relation suivante :

$$\Delta H = c_p(T_2 - T_1)$$

c_p $\left[\frac{J}{kg K}\right]$ étant la chaleur massique à pression constante et T [K] étant la température.

Chaleur

La chaleur spécifique Q $\left[\frac{J}{kg}\right]$, quant à elle, est déduite de la relation suivante :

$$Q + W = \Delta H$$

Transformations

La relation utilisée pour les compressions polytropiques est la suivante :

$$p v^n = \text{constant}$$

avec n étant l'indice polytropique.

La relation utilisée pour les refroidissements isobares est la suivante :

$$p = \text{constant}$$

Puissance

La puissance nécessaire à la compression est calculée de la manière suivante :

$$P = qm W$$

qm $\left[\frac{kg}{s}\right]$ étant le débit massique du gaz.

Pertes

La part d'énergie nécessaire à la compression Rw [—] est calculée par la relation suivante :

$$Rw = \frac{W_{tot}}{PCI}$$

W_{tot} $\left[\frac{J}{kg}\right]$ étant le travail spécifique total et PCI $\left[\frac{J}{kg}\right]$ étant le pouvoir calorifique inférieur du gaz considéré.

Le rapport de pertes par échange thermique Rq [—] est défini comme suit :

$$Rq = \frac{Q_{tot}}{PCI}$$

Q_{tot} $\left[\frac{J}{kg}\right]$ étant la chaleur spécifique totale.

Débit

Le débit volumique qv [$\frac{m^3}{s}$] est calculé en chaque point par la relation suivante :

$$qv = \frac{qm}{\rho}$$

qm [$\frac{kg}{s}$] étant le débit massique et ρ [$\frac{kg}{m^3}$] étant la masse volumique du gaz au point considéré.

Cylindrée et diamètre de piston

La cylindrée cyl [m^3] de chaque étage est déterminée par la relation suivante :

$$cyl = \frac{qv}{\omega}$$

ω [$\frac{tr}{s}$] étant le régime de rotation du compresseur.

Le diamètre de piston d [m] est calculé au moyen de l'équation suivante :

$$d = \sqrt{4 \frac{cyl}{\pi L}}$$

L [m] étant la course du piston.

Calculs des échangeurs

Le coefficient d'échange global k [$\frac{W}{m^2 K}$] est défini comme suit :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

α_1 [$\frac{W}{m^2 K}$] étant le coefficient de convection entre le gaz et la paroi, α_2 [$\frac{W}{m^2 K}$] étant le coefficient de convection entre l'eau et la paroi, e [m] étant l'épaisseur de paroi du tube et λ [$\frac{W}{m K}$] étant le coefficient de conduction du tube.

La puissance à dissiper $Pech$ [W] est calculée de la manière suivante :

$$Pech = Qech qm$$

$Qech$ [$\frac{W}{kg}$] étant la chaleur spécifique et qm [$\frac{kg}{s}$] étant le débit massique de gaz.

La différence moyenne de température de l'échangeur $\Delta\theta$ [K] est déterminée de la manière suivante :

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} [(Tgs - Tes) - (Tge - Tee)]$$

Tgs [K] étant la température du gaz à la sortie, Tes [K] étant la température de l'eau à la sortie, Tge [K] étant la température du gaz à l'entrée et Tee [K] étant la température de l'eau à l'entrée.

Le coefficient de transmission de chaleur ks [$\frac{W}{K}$] est calculé comme suit :

$$ks = \frac{Pech}{\Delta\theta}$$

La surface d'échange $S [m^2]$, quant à elle, est déterminée par la relation suivante :

$$S = \frac{ks}{k}$$

La longueur de tube nécessaire $L [m]$ est calculé comme suit :

$$L = \frac{S}{\pi d_{tube}}$$

$d_{tube} [m]$ étant le diamètre extérieur du tube.

Le débit d'eau $qm_{eau} [\frac{kg}{s}]$ nécessaire est calculé par la relation suivante :

$$qm_{eau} = \frac{Pech}{c (T_{es} - T_{ee})}$$

$c [\frac{J}{kgK}]$ étant la chaleur massique de l'eau.

Calculs de membranes

Les équations ci-dessous sont issues d'une étude sur les membranes réalisées par l'EPFL.

L'équation de la déformée $y(x) [m]$ de la membrane est la suivante :

$$y(x) = \frac{3 (1 - v^2)}{16 E ep^2} (r^2 - x^2)^2 \Delta P$$

$v [-]$ étant le coefficient de poisson, $E [Pa]$ étant le module d'élasticité, $ep [m]$ étant l'épaisseur de la membrane, $r [m]$ étant le rayon de la membrane et $\Delta P [Pa]$ étant la différence de pression nécessaire pour déformer la membrane.

L'équation de la contrainte radiale $\sigma r(x) [Pa]$ de la membrane est la suivante :

$$\sigma r(x) = \frac{3}{8 ep^2} [r^2(1 + v) - x^2(3 + v)] \Delta P$$

L'équation de la contrainte tangentielle $\sigma t(x) [Pa]$ de la membrane est la suivante :

$$\sigma t(x) = \frac{3}{8 ep^2} [r^2(1 + v) - x^2(1 + 3v)] \Delta P$$

Le volume $V [m^3]$ sous la membrane déformée est donné par la relation suivante :

$$V = 4\pi \int_0^r x y(x) dx$$

Constantes utilisées et valeurs choisies

masse molaire de l'hydrogène	: $M = 2$	$kg/kmole$
chaleur spécifique à pression constante	: $c_p = 14.3$	kJ/kgK
chaleur spécifique à volume constant	: $c_v = 10.3$	kJ/kgK
constante de l'hydrogène	: $r = 4.13$	kJ/kgK
indice isentropique de l'hydrogène	: $\gamma = 1.385$	—
pouvoir calorifique de l'hydrogène	: $PCI = 120$	MJ/kg
chaleur spécifique à pression constante	: $c_p = 14.266$	kJ/kgK
indice polytropique de compression	: $n = 1.3$	—
module d'élasticité de l'acier	: $E = 210$	GPa
coefficient de poisson de l'acier	: $\nu = 0.3$	—
conduction thermique de l'aluminium	: $\lambda = 200$	W/mK
coefficient de conduction gaz-paroi	: $\alpha 1 = 100$	W/m^2K
coefficient de conduction eau-paroi	: $\alpha 2 = 5000$	W/m^2K
chaleur massique de l'eau	: $c = 4180$	J/kgK

Résultats des calculs

Pressions

Pour établir les taux de compression de chaque étage, on cherche à ce que le travail de compression de chaque étage soit identique. Les pressions alors fixées sont les suivantes :

- Etage 1 : 5 à 15 bar
- Etage 2 : 15 à 40 bar
- Etage 3 : 40 à 110 bar
- Etage 4 : 110 à 300 bar

Les taux de compression sont alors les suivants :

- Etage 1 : 3.00
- Etage 2 : 2.67
- Etage 3 : 2.75
- Etage 4 : 2.73

Températures

On fixe les valeurs de température à l'entrée de chaque étage, de manière à ce que la température en sortie d'étage ne soit pas trop élevée (risque d'auto-inflammation et risque de détérioration des éléments mécaniques tels que joints,...). Les températures en sortie sont déterminées par calcul. Entre les étages, il est donc nécessaire de refroidir le gaz. Les températures du cycle sont les suivantes :

- Température à l'entrée du 1^{er} étage : 20°C
- Température à la sortie du 1^{er} étage : 105°C
- Température à l'entrée du 2^{ème} étage : 50°C
- Température à la sortie du 2^{ème} étage : 132°C
- Température à l'entrée du 3^{ème} étage : 50°C
- Température à la sortie du 3^{ème} étage : 135°C
- Température à l'entrée du 4^{ème} étage : 50°C
- Température à la sortie du 4^{ème} étage : 134°C
- Température à la sortie du compresseur : 50°C

Travail du cycle

- Etage 1 : 1.51 MJ/kg
- Etage 2 : 1.47 MJ/kg
- Etage 3 : 1.52 MJ/kg
- Etage 4 : 1.51 MJ/kg
- Total : 6.01 MJ/kg

Chaleur du cycle

- Chaleurs de compression
 - Etage 1 : -0.31 MJ/kg
 - Etage 2 : -0.30 MJ/kg
 - Etage 3 : -0.31 MJ/kg
 - Etage 4 : -0.31 MJ/kg
 - Total : -2.12 MJ/kg
- Chaleurs de refroidissement
 - Entre étage 1 et 2 : -0.78 MJ/kg
 - Entre étage 2 et 3 : -1.17 MJ/kg
 - Entre étage 3 et 4 : -1.21 MJ/kg
 - Entre étage 4 et sortie : -1.20 MJ/kg
 - Total : -4.36 MJ/kg
- Total chaleur : -6.49 MJ/kg

Puissance

Pour réaliser la compression de 5 à 300 bar, avec un débit volumique à l'entrée de $4 \text{ m}^3/\text{h}$, la puissance nécessaire vaut : 2.8 kW.

Pertes

En comparant le travail de compression avec le pouvoir calorifique de l'hydrogène, on peut déterminer la part d'énergie nécessaire à la compression.

- Part d'énergie nécessaire à la compression : 5.0 %

En comparant les chaleurs échangées avec le pouvoir calorifique de l'hydrogène, on peut en tirer la part de pertes.

- Pertes durant la compression : 1.8 %
- Pertes par refroidissement : 3.6 %
- Total pertes thermique : 5.4 %

En sommant la part d'énergie nécessaire à la compression et les pertes thermiques, on obtient :

- Part d'énergie « perdues » : 10.4 %

Cela signifie que, du point de vue purement thermodynamique, 10.4% de l'énergie disponible dans l'hydrogène est nécessaire pour sa compression.

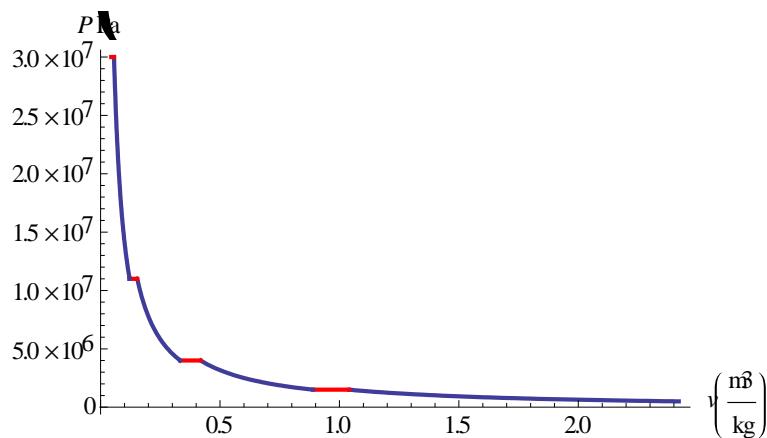


Figure 13 : Cycle thermodynamique du compresseur

2.4.5.2. DIMENSIONNEMENT DES ÉCHANGEURS

Entre chaque étage, un refroidissement du gaz refoulé est prévu, de manière à ne pas atteindre des températures trop élevées (risque d'inflammation et problème de résistance mécanique).

Sur la base des températures et chaleurs calculées précédemment, un dimensionnement approximatif des échangeurs est effectué.

On envisage de refroidir avec de l'eau circulant autour des tuyaux transportant l'hydrogène sous pression d'un étage à l'autre. On fixe une température d'eau à l'entrée de 15°C et une température d'eau à la sortie des échangeurs de 40°C.

Les tuyaux sont prévus en aluminium de 5 mm de diamètre extérieur avec une épaisseur de paroi de 1mm.

Les surfaces d'échanges calculées sont les suivantes :

- Refroidissement entre étage 1 et 2 : 0.073 m²
- Refroidissement entre étage 2 et 3 : 0.086 m²
- Refroidissement entre étage 3 et 4 : 0.087 m²
- Refroidissement entre étage 4 et sortie : 0.087 m²

On obtient les longueurs suivantes :

- Longueur entre étage 1 et 2 : 4.66 mm
- Longueur entre étage 2 et 3 : 5.50 mm
- Longueur entre étage 3 et 4 : 5.56 mm
- Longueur entre étage 4 et sortie : 5.54 mm

Les débits d'eau nécessaires sont les suivants :

- Débit dans le 1^{er} échangeur : 12.3 l/h
- Débit dans le 2^{ème} échangeur : 18.5 l/h
- Débit dans le 3^{ème} échangeur : 19.2 l/h
- Débit dans le 4^{ème} échangeur : 19.0 l/h
- Débit total : 69.0 l/h

2.4.5.3. DIMENSIONNEMENT DES ÉTAGES

Connaissant la course ainsi que le débit volumique de chaque étage, le diamètre de chaque piston est déterminé.

De manière à simplifier la conception, on fixe une course identique pour tous les cylindres. La valeur de course choisie est de 20 mm. Ainsi, les diamètres de piston ont des valeurs raisonnables, d'une part, et la vitesse max des pistons ne sera pas trop élevée (2.5 m/s).

Les valeurs sont les suivantes :

- Course : 20 mm
- Diamètre piston 1 : 38.9 mm
- Diamètre piston 2 : 23.6 mm
- Diamètre piston 3 : 14.5 mm
- Diamètre piston 4 : 8.7 mm

2.4.5.4. DIMENSIONNEMENT DES MEMBRANES

Le compresseur étant un modèle à membranes, il est nécessaire d'étudier ces dernières. Le dimensionnement ci-après est basé sur une étude réalisée par l'EPFL traitant de la déformation d'une membrane sous l'effet d'une pression.

Pour déterminer les dimensions de ces membranes, nous avons fixé la contrainte max. Connaissant le volume nécessaire sous la membrane déformée (défini par la cylindrée), nous sommes en mesure de dimensionner les membranes.

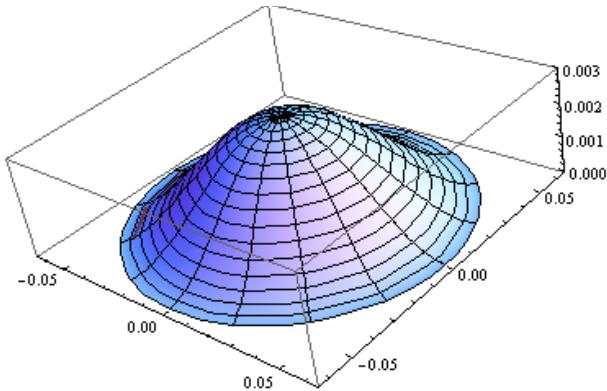


Figure 14 : Allure de la membrane déformée (les axes ne sont pas à l'échelle)

Nous avons fixé la contrainte max à 200 N/mm^2 , ce qui correspond à un facteur de sécurité d'environ 5, pour de l'acier à haute résistance. Nous avons également fixé une épaisseur de membrane de 0.3 mm. A partir de ces valeurs, les résultats sont les suivants :

- Diamètre actif de la 1^{ère} membrane : 124.5 mm
- Diamètre actif de la 2^{ème} membrane : 96.9 mm
- Diamètre actif de la 3^{ème} membrane : 75.8 mm
- Diamètre actif de la 3^{ème} membrane : 58.9 mm
- Déplacement max de la 1^{ère} membrane : 2.94 mm
- Déplacement max de la 2^{ème} membrane : 1.78 mm
- Déplacement max de la 3^{ème} membrane : 1.09 mm
- Déplacement max de la 3^{ème} membrane : 0.66 mm

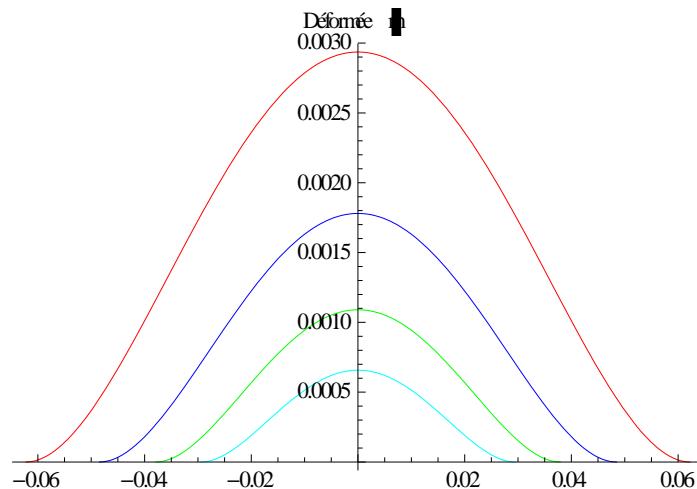


Figure 15 : Allure de la déformée des membranes (rouge : membrane 1, bleu : membrane 2, vert : membrane 3, cyan : membrane 4)

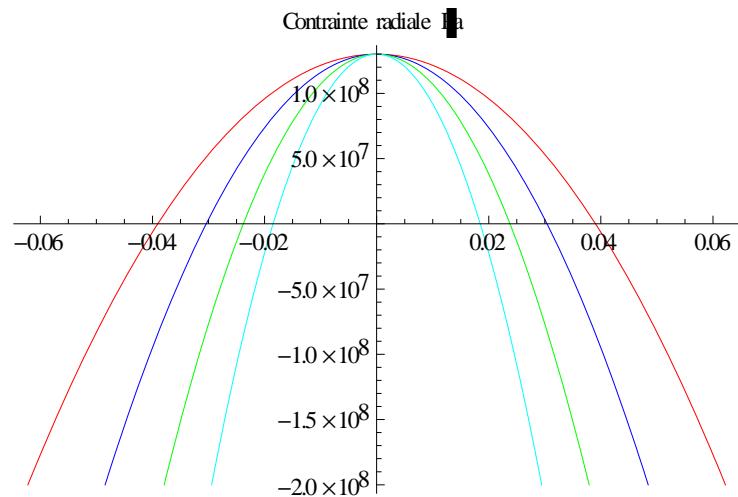


Figure 16 : Allure de la contrainte radiale dans les membranes ((rouge : membrane 1, bleu : membrane 2, vert : membrane 3, cyan : membrane 4)

De manière à vérifier les résultats, des analyses par éléments finis ont été réalisées ; les valeurs sont en corrélations avec les calculs. L'image ci-après est un exemple des résultats obtenus par éléments finis :

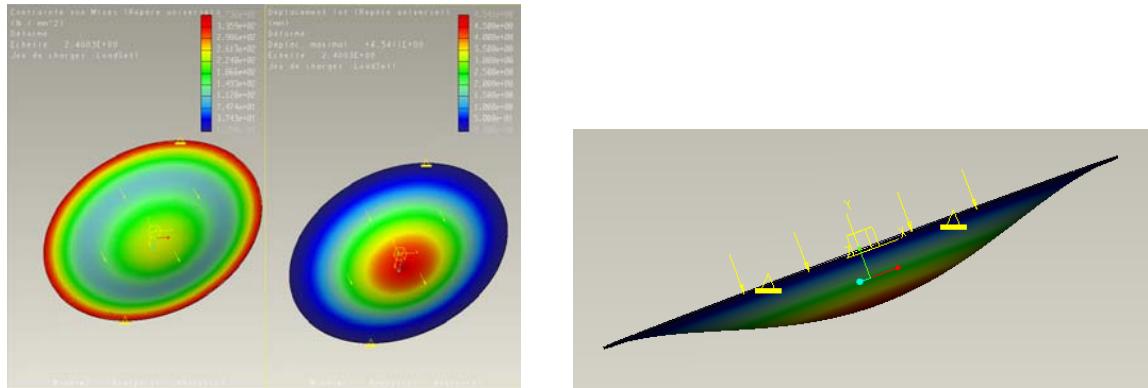


Figure 17 : Analyse par éléments finis des membranes

2.4.5.5. BILAN ÉNERGÉTIQUE

De manière à évaluer la rentabilité du système, il est important de s'intéresser à son bilan énergétique.

• Puissance nécessaire à la compression	: 2.76	kW
• Puissance perdue par chaleur durant la compression	: 0.98	kW
• Puissance perdue par chaleur dans les échangeurs	: 2.00	kW
• Puissance perdue par frottements mécanique (rendement de 85%)	: 0.41	kW
• Puissance perdue dans le moteur électrique (rendement de 85%)	: 0.48	kW
• Puissance totale absorbée	: 3.65	kW
• Rendement du compresseur	: 75.6	%
• Puissance disponible dans l'hydrogène	: 55.1	kW
• « Rendement » global du compresseur	: 1510	%
• Rapport de puissance absorbée/puissance disponible	: 6.62	%

On se rend compte que finalement, une part de 6.6% du pouvoir calorifique est nécessaire, uniquement pour la compression. La valeur du rendement global est de 1510% ; ceci signifie que pour 1 kW d'énergie électrique apportée au compresseur, il en résulte une énergie disponible dans l'hydrogène de 15.1 kW.

Pour avoir le bilan complet, il faudrait encore tenir compte du bilan de la production, du stockage ainsi que du rendement de l'installation sur le bateau.

2.4.6. CONCEPTION

Dans ce chapitre, sur la base du dimensionnement des paragraphes précédents, une ébauche de conception est réalisée. Le but de cette phase est de démontrer la faisabilité d'un tel compresseur. C'est pourquoi il ne s'agit que d'une ébauche ; une foule de « détails » reste à régler avant de pouvoir mettre en fabrication un prototype.

Ci-après, des images CAO du concept sont présentées brièvement.

Architecture

De manière à être compact, la solution de cylindres disposés en étoile est choisie.

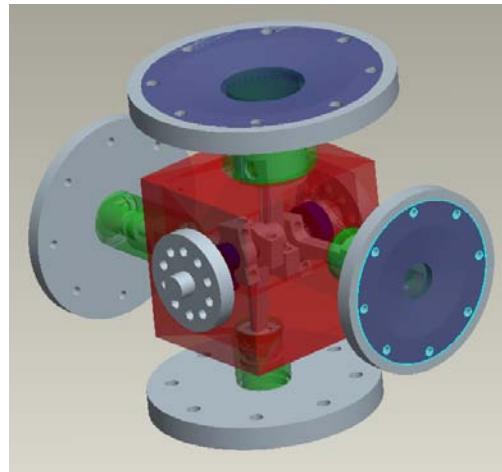


Figure 18 : Architecture en étoile

Pistons

Les pistons sont dimensionnés selon les calculs précédents. Les diamètres des pistons du 3^{ème} et 4^{ème} étage étant faibles, ils sont de type à étage. Ainsi, le guidage est amélioré.

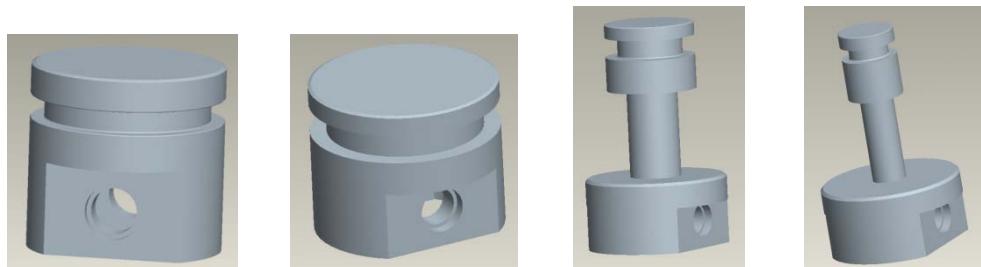


Figure 19 : Géométrie des pistons (de gauche à droite : piston de l'étage 1 à 4)

Vilebrequin et bielles

Le vilebrequin est prévu avec deux bielles par manetons. Le graissage des paliers de bielle est prévu par l'intérieur du vilebrequin. Une ébauche est visible ci-après :

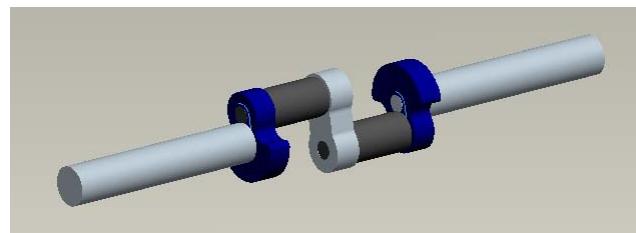


Figure 20 : Vilebrequin

Les bielles sont de types classiques et dimensionnées pour être géométriquement correctes, d'une part, et pour supporter les efforts, d'autre part.

Cylindres

Les cylindres sont des chemises rapportées dans le carter. Les chemises permettent le guidage des pistons. L'extérieur de la chemise est en contact avec le circuit d'eau de refroidissement. Ci-après, on voit une représentation d'une chemise pour un piston étage (étage 3 et 4) :

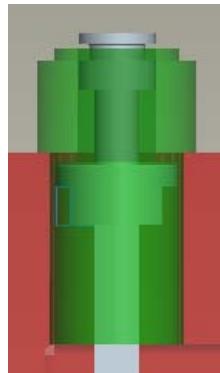


Figure 21 : Cylindre pour piston étagé

Culasses

Les culasses sont composées chacune de six éléments principaux :

- La culasse inférieure : pièce en contact avec le cylindre et supportant la membrane
- La membrane : élément déformable
- La culasse supérieure : supportant la membrane et les clapets d'admission et refoulement
- La plaque support des clapets
- Les clapets : un clapet d'admission et un clapet d'échappement
- Le cache-clapet

La partie inférieure de la culasse est en contact avec le cylindre. La zone située entre le piston et la membrane est remplie d'huile. Cette dernière permet d'appliquer la force de compression sur toute la surface de la membrane.

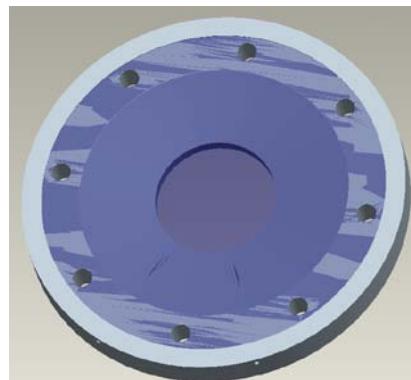


Figure 22 : Culasse inférieure avec la membrane

La partie supérieure de la culasse possède des trous pour l'admission et le refoulement du gaz. La forme de la chambre de compression est identique à la forme de la membrane déformée ; ainsi, le risque de casse de la membrane en cas de surcharge est supprimé. Toutefois, un volume mort, déterminé par calcul, est nécessaire, pour garantir le bon taux de compression pour chaque étage.

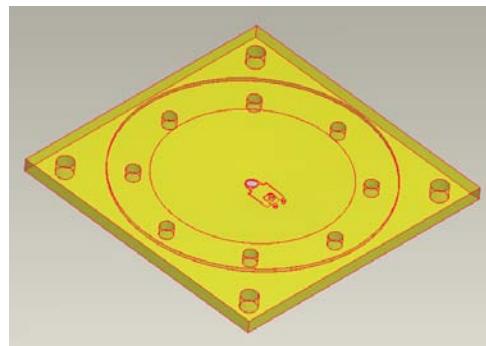


Figure 23 : Culasse supérieure

La plaque support des clapets, comme son nom l'indique, permet de fixer les clapets d'admission et d'échappement.

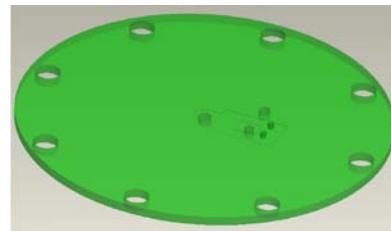


Figure 24 : Plaque support clapets

Les clapets sont de simples lames fines. A l'état de repos, la lame bloque le passage du gaz. C'est la pression différentielle qui permet l'ouverture ou la fermeture des clapets.

Pour chaque clapet, une pièce limitant sa déformation est installée.



Figure 25 : Clapet d'admission (à gauche) et clapet d'échappement (à droite)

Finalement, le cache-clapet est la dernière pièce de l'ensemble. Elle sert à protéger le clapet et à transférer l'hydrogène sous pression dans le système de refroidissement, avant d'entrer dans l'étage de compression suivant.

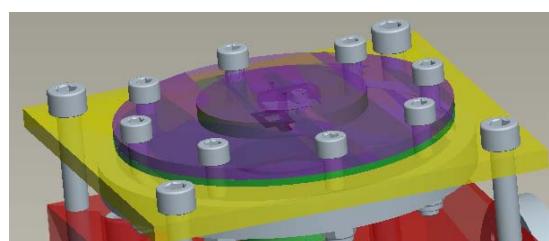


Figure 26 : Culasse complète

Moteur électrique

Un moteur électrique correspondant au besoin du compresseur est choisi, permettant ainsi de se faire une idée de la taille et de l'accouplement entre moteur et compresseur.

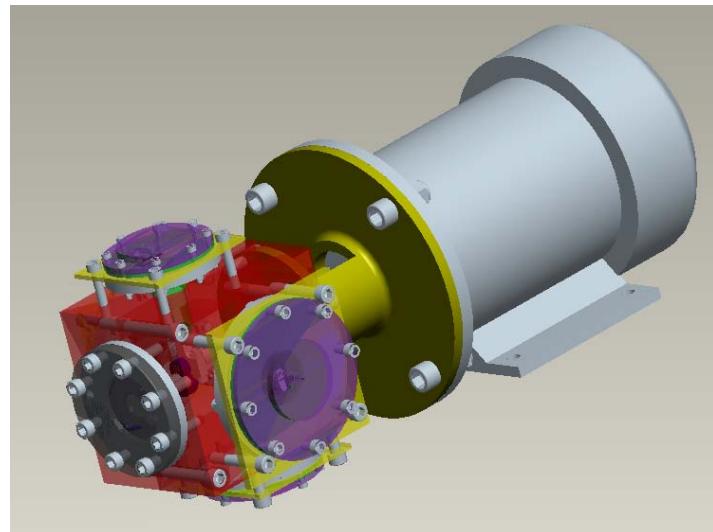


Figure 27 : Vue du compresseur accouplé au moteur

Aggregats

Pour fonctionner, le compresseur nécessite un circuit de graissage sous pression et donc l'implantation d'une pompe à huile. L'idée est de développer une pompe à engrenage, placée directement en bout de vilebrequin.



Figure 28 : Pompe à huile en bout de vilebrequin

En outre, il est nécessaire de mettre en place une pompe à eau pour faire circuler le liquide de refroidissement dans le compresseur et dans les échangeurs.

Non représenté sur le CAO, il faut encore y ajouter les échangeurs ainsi que toutes les sécurités requises (limites de températures et pressions pour chaque étage).

2.4.7. CARACTÉRISTIQUES DU COMPRESSEUR

Les caractéristiques du compresseur dimensionné ci-dessus sont les suivantes :

- Type : compresseur à membranes
- Pression d'entrée : 5 bar
- Pression de sortie : 300 bar
- Débit massique : 1.65 kg/h
- Débit volumique à l'entrée (20°C) : 4000 l/h
- Débit volumique à la sortie (50°C) : 73.5 l/h
- Nombre d'étage : 4
- Disposition des cylindres : en étoile
- Régime de rotation : 2'800 tr/min
- Puissance absorbée : 3.65 kW
- Rendement du compresseur : 75.6 %
- Encombrement approximatif (sans échangeurs) : 620 x 250 x 250 mm

3. CONCLUSION

A première vue, le haut pouvoir énergétique de l'hydrogène le rend potentiellement prometteur en tant que carburant. Pourtant, on prend vite conscience que sa densité volumique d'énergie est faible et que, pour être utilisable, il est quasi indispensable de le comprimer.

Pour effectuer cette compression, il est nécessaire de développer un compresseur, en tenant compte des particularités d'un gaz tel que l'hydrogène, en termes de dangers principalement. En raison de son domaine d'inflammabilité très large, de sa très faible énergie d'inflammation ainsi que de sa température d'auto-inflammation, il faut impérativement prendre des mesures pour éviter tout risque d'accident.

Pour l'application souhaitée, l'étude menée s'est orientée vers un compresseur à quatre étages à membranes. Ces dernières permettent d'avoir une étanchéité et séparation complète du gaz à comprimer d'avec la mécanique du compresseur lui-même. De manière à limiter le risque d'auto-inflammation, entre autre, le gaz est refroidi à la sortie de chaque étage, au moyen d'échangeurs hydrogène-eau.

Tous les calculs permettant de dimensionner le compresseur sont faits et une ébauche de conception est réalisée. Par cette étude, il s'avère qu'un tel compresseur est faisable. Bien que la conception ne soit qu'au stade d'ébauche, il serait intéressant de finaliser et de réaliser un premier prototype, afin de confronter les résultats expérimentaux aux valeurs théoriques.

En termes de performances, le modèle étudié offre une pression de sortie de 300 bar sous un débit d'électrolyseur de $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Pour cela, un moteur électrique de 3.6 kW environ est nécessaire. Le rendement estimé du compresseur est de l'ordre de 75%. Par rapport au pouvoir calorifique de l'hydrogène, son fonctionnement consomme approximativement 6.6%.

Afin de juger objectivement la rentabilité d'un tel système, il serait intéressant de réaliser le bilan complet de tout le système (production, compression, transfert, stockage, utilisation,...).

Le Locle, le 18 janvier 2010

Thierry Robert - Christophe Varidel

4. BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

- G. LEMASSON, *Les machines transformatrices d'énergie*, Tome 1, Librairie Delagrave
- Divers dossiers des *Techniques de l'ingénieur*
- Divers sites internet