

Introduction

En 1992 l'équipe du Prof. Yvon du Laboratoire de Cristallographie de l'Université de Genève développait un prototype de tondeuse à hydrogène. Depuis huit ans, ce prototype, dérivé d'une tondeuse commerciale, a été régulièrement utilisé, ce qui constitue un test de longue durée pour la tondeuse, totalisant environ 100 heures de fonctionnement et plus que 40 cycles de recharge du réservoir d'hydrogène.

La présente étude de faisabilité élabore la démarche d'évaluation du potentiel de marché d'une tondeuse à hydrogène en considérant les aspects suivants :

- la viabilité économique du système de stockage de l'hydrogène dans des hydrures métalliques (HM) ;
- l'infrastructure de distribution de l'hydrogène ;
- la demande potentielle et l'acceptabilité par les consommateurs du système de stockage de l'hydrogène.

Dans cette étude, nous allons dans un premier temps détailler le prototype de tondeuse en examinant le sous-système hydrogène. Ceci nous donne une première description des caractéristiques et des performances de la technologie, ainsi qu'une estimation grossière du coût d'un kit adaptable aux tondeuses existantes par retrofit (Section 1). Nous traiterons ensuite du vecteur énergétique hydrogène, par une revue de la littérature sur la technologie des HM, afin d'esquisser les premiers critères de choix du produit (Section 2). L'analyse de la viabilité économique des HM constitue le sujet de la Section 3. Nous dressons, notamment, une liste des principaux acteurs de ce marché. Nous esquissons ensuite des propositions pour la réalisation concrète d'un petit réseau de distribution d'hydrogène sur le Canton de Genève (Section 4). Dans la Section 5 et les Annexes 1 et 2 nous discutons les raisons techniques des importantes synergies industrielles qui se développent dans l'industrie mondiale en liaison avec l'utilisation de l'hydrogène en tant que combustibles, surtout, dans le cadre de la Pile à Combustible ou Fuel Cell (FC). La Section 6 esquisse la démarche de réalisation d'un sondage aléatoire destiné à évaluer la demande d'HM, tandis que la Section 7 présente le calendrier d'exécution de l'étude ainsi qu'une estimation du budget nécessaire à la réalisation de l'étude.

1. La tondeuse à hydrogène captif

La tondeuse-prototype qui nous sert de référence a un moteur de 80 cm³ et est alimentée avec une bonbonne d'HM contenant 1 mètre cube normal d'hydrogène (Nm³H₂). Ainsi conçue la tondeuse peut tondre 800m² de gazon en quatre séances distinctes de 20 minutes chacune.

Le mode de fonctionnement est important et nous sert de critère par la suite car un réservoir pouvant se décharger de manière continue sera plus compliqué et coûteux qu'un réservoir pouvant assurer 1/4 de la décharge continue avant l'arrêt, et ceci en raison du moindre transfert de chaleur requis. La moindre performance en transfert de chaleur simplifie la bonbonne. Nous pouvons dès lors déjà identifier un critère : le débit voulu et le temps maximal de fonctionnement. Ces questions devront être étudiées en détail dans l'étude de marché.

La tondeuse fonctionne sans grandes variations de puissance (débit d'hydrogène) en fonction de la surface du gazon. En ce qui concerne la performance en durée, le prototype est utilisé pendant environ 20 minutes de manière continue pour tondre environ 400 m² de gazon¹.

1.1 Modifications et composantes

La tondeuse à gazon à hydrogène captif du Laboratoire de Cristallographie est une tondeuse Honda, modèle HR 173, adaptée, en vue du fonctionnement à l'hydrogène, avec une bonbonne d'HM fournie par l'entreprise Gesellschaft fur Elektrometallurgie. Les modifications apportées sont les suivantes :

- remplacement du réservoir d'essence par une bonbonne d'HM ;
- ajout d'une vanne de réglage, un manomètre, un tuyau à gaz avec connexion «quick-connect» ;
- forage du moteur afin de placer un injecteur d'hydrogène.

Les articles suivants ont été achetés chez le fournisseur Swagelok² :

Composante	Quantité	Prix (CHF)
Coude union	1	30
T à embranchement femelle	1	60
Vanne à boisseau cylindrique	1	84.15
Vanne micrométrique	1	108.55
Connecteur mâle	1	36.15
Connecteur femelle	1	45.95
Adaptateur pour mano	2	49.9
Tube inox diamètre 6,2	6 mètres	30
Mano 0 - 60 bars	1	60
Tuyau flexible	1	45

Tableau 1 – Composantes du système hydrogène (réservoir exclu)

Il reste à ajouter la bonbonne et la tondeuse :

	Modèle	Producteur	Prix (CHF)
Bonbonne	HR 173	Gfe	2000
Tondeuse	KL 1 AR	Honda	1000

Tableau 2 – Investissement primaire

Cette liste inclut les composantes nécessaires pour la recharge en H₂.

¹ La surface du gazon chez le Prof. Yvon.

² Les prix sont de 1992.

1.2 Analyse de performance

L'étude devra inclure à notre avis une analyse de la performance de la bonbonne et de la tondeuse, afin de définir les caractéristiques du produit. L'analyse de la performance comportera différents tests dont :

- un test de décharge continue (journée froide, et chaude)
- un test de variations de puissance (débit min./max.)
- une charge de la bonbonne à l'air ambiant et dans l'eau froide
- un test de puissance de la tondeuse (longueur du gazon)
- pureté de l'hydrogène.³

Nous pensons qu'il sera ainsi possible d'établir un arbitrage entre la durée de fonctionnement et la complexité du système de transfert de chaleur. Dans le cas où, à titre d'exemple, nous considérerions acceptable de faire une pause après 20 minutes de tonte (ce qui laisserait le temps pour le transfert de chaleur) le design de la bonbonne pourrait être dès lors simplifié par la suppression d'échangeurs de chaleur externes, qui causent un grand renchérissement du produit. Nous prévoyons un mois de travail pour effectuer ces tests.

La procédure de certification qui est appliquée aux bonbonnes d'HM est celle des réservoirs sous pression. Elle est aussi une cause de renchérissement du produit.

1.3 Discussion

Le dimensionnement de la bonbonne dépend de l'application. Il est par conséquent important de choisir les applications prioritaires et d'analyser en détail le type de performance souhaité, et ceci dans la mesure où :

- une bonbonne de conception « simplifiée » est la clé de passage du prototype de laboratoire au produit commercial ;
- la production en série fait désormais partie des décisions stratégiques des producteurs d'HM.

2. L'Hydrogène

“The auto industry needs to achieve over the next decade a shift from the carbon end of the fuels spectrum to the hydrogen end”⁴

2.1 L'hydrogène vecteur énergétique

L'intérêt pour l'hydrogène en tant que combustible n'est pas récent : l'hydrogène est un vecteur énergétique connu et non polluant et peut être produit par un cycle entièrement renouvelable.

³ Voir 4.2.

⁴ Dr. William F. Powers, Vice-President Ford (www.sae.org/automag/global_viewpoints/03.htm)

Depuis le début des années 90, des progrès technologiques énormes ont été accomplis dans les domaines de la production/stockage d'hydrogène et des technologies d'utilisation. En conséquence, les médias évoquent de plus en plus souvent des voitures à FC qui seraient alimentées à l'hydrogène - ou au méthanol - et qui contribueraient largement à résoudre le problème de la pollution urbaine et à diminuer la dépendance à l'égard du pétrole⁵. Il est également reconnu que c'est la technologie de *stockage* de l'hydrogène qui constitue un frein à la conception de nouvelles applications de l'hydrogène.

Plusieurs entreprises participent activement au développement de nouvelles applications de l'hydrogène et ceci se reflète dans l'effervescence considérable qui caractérise les marchés financiers associés aux technologies le concernant. Différents produits, où l'on espère additionner les avantages écologiques de l'hydrogène avec la performance énergétique des FC, sont à l'heure actuelle à l'étude. Dans tous les cas, si une nouvelle technologie, qui peut être révolutionnaire, fait appel à l'hydrogène, la question de la *gestion globale* du combustible va se poser tant du point de vue du coût que de l'infrastructure et de l'acceptabilité par le public. Nous cherchons à répondre à ces questions.

2.2 Les hydrures métalliques pour le stockage d'hydrogène

Dans les hydrures métalliques (HM), l'hydrogène est stocké dans les espaces intra atomiques du métal. Le métal, souvent un alliage, absorbe et rejette l'hydrogène à différentes températures et pressions. La technologie est relativement récente, mais les hydrures métalliques sont déjà utilisés comme électrodes négatifs des batteries Nickel-MH des téléphones et ordinateurs portables. La bonbonne d'HM en tant que *réservoir* d'hydrogène ne connaît pas encore un usage répandu. Les HM sont employés notamment dans les produits de niche tels que les kits de démonstration pour FC, sous-marins, stockage de deutérium, GPS etc.⁶

Pour ce qui concerne le développement des alliages d'HM, la littérature spécialisée décrit plusieurs mélanges de métaux et terres rares étudiés pour leur capacité d'absorption de l'hydrogène. Il existe donc beaucoup d'HM différents et, pour la plupart d'entre eux le coût se situe entre 50 et 100 CHF/kg⁷.

Une liste non exhaustive des alliages avec leurs caractéristiques physiques d'absorption est fournie ci-dessous⁸.

⁵ Des FC à l'essence désulfurée sont également en développement (e.g. www.nuvera.com), mais le rendement du système baisse considérablement à cause des hautes températures requises pour le *reforming* des hydrocarbures. Voir : G. Fiorito, *PEMFC systems – A techno-economic analysis*, travail de diplôme en Energie EPFL, 1997.

⁶ Voir annexe : Projets Gfe.

⁷ Source Prof. Yvon.

⁸ Pettrsonn J. and Hjortsberg O. *Hydrogen storage alternatives – a technological and economic assessment*, Volvo Teknisk Utveckling AB, 1999.

Alliage	% H ₂ en poids (sans réservoir)	Pression de dissociation (bar)	Température de dissociation (°C)
MgH ₂	7.6	1.0	290
Fe _{0.8} Ni _{0.2} TiH ₆	5.5	1.0	80
Mg ₂ NiH ₄	3.6	1.0	250
Ti _{0.9} Zi _{0.1} Mn _{0.15} V _{0.2} Cr _{0.4} H _{3.2}	2.1	9.0	20
Ti _{0.98} Zi _{0.02} Mn _{1.5} V _{0.45} Fe _{0.1}	2.1	10.0	24
Cr _{0.05} H _{3.4}			
TiFeH _{1.9}	1.8	10.0	50
TiFe _{0.85} Mn _{0.15} H _{1.9}	1.8	5.0	40
TiMn _{1.5} H _{2.47}	1.8	7.0	20
Ti _{0.8} Zi _{0.2} Cr _{0.8} Mn _{1.8} H _{3.0}	1.8	5.0	20
Ti _{0.8} Zi _{0.2} Cr _{0.8} Mg _{1.8} Mo _{0.2} H _{3.0}	1.7	~58	20
MmNi _{4.5} Mn _{0.5} H _{6.6}	1.5	~58	50
LaNi ₅ H _{6.7}	1.4	~58	50
MnNi ₅ H _{6.3}	1.4	~493	50
LaNi _{4.6} Al _{0.4} H _{5.5}	1.3	~29	80
TiCoH _{1.4}	1.3	~15	130

Tableau 3 – Principaux alliages pour le stockage d'hydrogène

Dans le segment des petites applications que nous considérons dans notre étude (0.1-5kW), les HM sont considérés comme une technologie de stockage prometteuse. La densité énergétique des HM qui nous intéressent se situe entre 300 et 320 Wh_{th}/kg ou 700 et 1400 Wh_{th}/lt.

2.3 Critères de choix du produit

Nous devons remarquer que, pour le même alliage, différentes conditions de température et de pression conduisent en général à diverses quantités d'hydrogène stocké. Nous allons dès lors restreindre le choix aux HM qui fonctionnent à une température proche de la température ambiante (20/25°C) et à basse pression. L'alliage qui nous intéresse est un mélange de cinq ou six éléments distincts, il absorbe à des températures inférieures à 80°C et à une pression d'environ 20 bars atmosphériques. Dans l'analyse de performance de la recharge, le test aura lieu avec l'HM immergé dans l'eau froide pour quantifier le gain en temps du processus⁹. Quant à la décharge de l'hydrogène, lors de la sélection de la gamme de produits, nous nous restreindrons aux HM qui assurent le débit minimum pour le fonctionnement de la tondeuse.

L'objet de l'étude est le réservoir d'HM appliqué à la tondeuse, mais il serait contre-productif, lors du choix de la bonbonne d'HM, d'avoir comme seul critère de sélection du produit la gamme des tondeuses sur le marché. L'hydrogène a

⁹ La durée de la recharge est un facteur essentiel pour l'attractivité du produit. A titre d'exemple, une bonbonne de 2550 lit. nécessite un temps de recharge de 4 heures à l'air ambiant et 45 minutes dans l'eau à 20°C. Référence: Ergenics corporation.

certainement sa meilleure application dans les piles à combustible¹⁰, il serait naïf de confiner le choix de la bonbonne d'hydrures aux seules configurations capables d'assurer le fonctionnement des tondeuses selon la cylindrée de leur moteur à combustion interne (ICE). Nous devrions au contraire songer à (au moins) 3 tailles de bonbonnes différentes aptes à satisfaire les besoins en énergie et en puissance d'applications telles que :

- ❑ les voitures pour terrains de golf
- ❑ les vélomoteurs
- ❑ les chaises pour handicapés
- ❑ les jouets (jeep radio commandés, go-karts)
- ❑ les électroniques diverses

La raison fondamentale qui justifie des applications avec les FC est le très haut rendement énergétique de la FC par rapport à un moteur à combustion. A titre d'exemple une FC peut atteindre 55-60% de rendement électrique alors qu'un petit ICE atteint au mieux 30% par rapport au contenu énergétique du combustible¹¹.

Remarque : La modularité de la technologie des hydrures métalliques permet de concevoir des systèmes où différentes bonbonnes seraient utilisées en parallèle, notamment en cas de :

- puissance importante, ex. voiture pour terrain de golf ⇒ Bonbonnes en parallèle
- fiabilité élevée, ex. chaise pour handicapés. ⇒ Mini bonbonne de réserve

Vu la modularité de la technologie, nous croyons, dans cette phase préliminaire, pouvoir nous concentrer sur trois modules :

Capacité en volume	MJ	kWh	Application
1 Nm ³ H ₂	10	2.8	chaises hand. vélomoteurs, aspirateurs, ape
1/2 Nm ³ H ₂	5	1.4	vélos, trottinettes
1/4 Nm ³ H ₂	2.5	0.7	Ordinateurs, cameras vidéo, jeux

Tableau 4 - Applications des Hydrures métalliques

Chacune de ces configurations peut exiger un volume d'hydrogène stocké variant de + ou - 10%.

2.4 Concurrents: stockage comprimé et nanotubes

Pour ce qui concerne le stockage sous forme de gaz comprimé, nous avons contacté le représentant français de l'entreprise IMPCO Technologies ainsi que l'entreprise française Ullit. Il apparaît que IMPCO est en train de développer des réservoirs à

¹⁰ Les technologies PEM et Alkaline, à basse température, constituent les meilleurs candidats pour des applications "niches" où l'on attribuerait une grande valeur à un moteur silencieux et non polluant.

¹¹ Une liste résumant les projets liés aux PEMFC se trouve sur le site: www.hydrogen.org/News/pem%20doe%20list%20dec%20797-e.html

haute (200-300 bars) et très haute (600-700 bars) pression mais seulement dans des projets de développement engageant les constructeurs automobiles¹².

L'entreprise française Ullit a certifié récemment des systèmes de stockage comprimé de Gaz Naturel pour des bus et elle est en train de développer des réservoirs d'hydrogène, toutefois, elle affirme que: "*Dans l'immédiat nous n'avons pas de réservoirs d'hydrogène. Nous travaillons sur le sujet, cependant il n'y aura rien de concret avant 2 ans*".¹³

Nous avons également étudié le développement des nanotubes. Il existe plusieurs sites internet qui présentent les compagnies produisant différentes configurations de ce matériel¹⁴, mais dans un futur proche il n'est pas possible d'acheter un réservoir pour le stockage d'hydrogène¹⁵.

3. Les coûts

Il nous faut d'abord rappeler que les HM ne sont pas encore des produits commercialisés. Si on peut acheter une grande variété d'alliages, il n'existe que très peu de compagnies pouvant livrer des bonbonnes finies. Nous avons dès lors effectué des contacts préliminaires avec les producteurs d'HM et les distributeurs d'hydrogène afin d'esquisser l'analyse technico-économique d'évaluation du coût de la bonbonne.

Les coûts sont décomposés en :

- coût d'investissement pour la bonbonne
- coût de l'hydrogène commercial
- coût d'implémentation de l'infrastructure

3.1 Le marché des HM

Il nous a paru logique de poursuivre d'abord le contact avec l'entreprise Gesellschaft fur Elektrometallurgie Mbh, qui a fourni l'hydrure qui alimente la tondeuse. Nous avons ainsi cherché à estimer séparément le coût de l'alliage de celui de la bonbonne, mais les informations nécessaires à cette évaluation sont encore très confidentielles.

En effet, nous avons appris que les compagnies qui développent les hydrures (alliage) donnent ensuite en sous-traitance la fabrication de la bonbonne à des entreprises certifiées (ex. TUV en Allemagne), ce qui explique, au moins en partie, le grand renchérissement du réservoir par rapport au coût des matières premières¹⁶.

Néanmoins, Gfe a déjà produit en grande série une petite bonbonne d'HM. Gfe a produit une centaine de bonbonnes différentes, pour un total d'environ 4700 unités,

¹² En effet IMPCO développe des systèmes- combustibles complets (à opposer au simple réservoir) pour des voitures prototype et ne semble pas intéressé aux projets de petite puissance.

¹³ Ing. H. Ullit communication personnelle, 9 février 2001.

¹⁴ Voir : <http://www.fibrils.com/>

¹⁵ Dillon A.C. et al. *Carbon Nanotube Materials for Hydrogen Storage*, National Renewable Energy Laboratory, Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review (Mai 2000).

¹⁶ L'autre raison étant le bas volume de production.

dont plusieurs milliers d'une petite bonbonne HM pour un kit de démonstration avec une FC à membrane polymère (PEMFC)¹⁷.

Nous avons également établi des contacts avec d'autres producteurs dont les compagnies américaines Hydrogen Components Inc. et Ergenics Inc. ainsi qu'avec Ovonics et Japan Metal and Chemicals. Nous avons pu remarquer que l'information sur les coûts de la bonbonne n'est pas accessible par téléphone ou e-mail. Ces informations sont confidentielles car elles concernent le design détaillé de la structure *interne* de la bonbonne, ainsi que le système de transfert de chaleur.

Une liste des producteurs est fournie ci-dessous avec un descriptif.

Compagnie	Type de produit	Description et statut	Prix	Personne contactée
Gesellschaft fur Elektrometallurgie	Bonbonnes complètes	Expérience de grande série	Prix disponibles sur demande	M. Andreas Otto
Treibacher Auermet	Alliage	Vends l'alliage seulement	Disponibles sur demande	Mme Lassnig, Mr. Barbic
Japan Metals & Chemicals	Bonbonnes complètes	Expérience de grande série	Disponibles sur demande	M. Ishifuzu
Ovonics, USA	Bonbonnes complètes	Développement du produit	Prix non disponibles	Mme. Angela Goddart
Metallic power, USA	Pastilles contenant H2	Concurrent		info@metallicpower.com
Aluminum power, USA	Pastilles contenant H2	Concurrent		info@aluminum-power.com
Hydrogen Components	Bonbonnes complètes	HM en acier et aluminium	Prix disponibles	h2comp@rmi.net
Russie, Ukraine	Bonbonnes complètes	ref. Yvon
Ergenics, USA.	Bonbonnes complètes	HM en acier et aluminium	Prix disponibles	mail_us@ergenics.com

Tableau 5 – Producteurs d'HM

L'entreprise Treibacher-Auermet s'est dite prête à offrir gratuitement des échantillons des ses différents HM. Ces échantillons pourront être comparés avec ceux développés par l'équipe du Prof. Yvon.

3.2 Evaluation du coût des HM

Le coût du stockage par HM dépend principalement des propriétés désirées, c'est à dire, température, pression, densité du stockage, taille du système, etc. A titre de référence pour un système de 30 Nm³ (90kWh) le coût se situe entre 13000 et 50000 DM avec des poids entre 230 et 420 kg et des volumes de 60 / 90 litres. Une évaluation approximative de l'échelle des prix donne les chiffres suivants : 800 –

¹⁷ Voir annexe : Information Gfe01.

3000 DM pour 1 Nm³ d'H₂, 400 - 1500 DM/Nm³ pour 10 Nm³ et 300 - 1100 DM/Nm³ pour 100 Nm³ d'hydrogène stocké¹⁸.

Les experts estiment qu'à présent, le coût des matières premières (HM et bonbonne) représente 20% du prix final de l'HM. En effet, si dans la littérature¹⁹ on estime que la fabrication de la bonbonne en grandes quantités devrait représenter un doublement du coût de l'alliage (100% de renchérissement), en pratique le prix est beaucoup plus élevé. La raison est que les HM sont produits « sur demande », et donc, probablement des marges de 100% sont appliquées à chaque phase de la production des HM.

Nous avons procédé à une évaluation des économies d'échelle en demandant des offres pour différentes quantités de HM. Les prix sont réduits de 25% en achetant 25 ou plus unités identiques. Pour 100 unités identiques la réduction semble être beaucoup plus importante. Le temps de livraison s'allonge et, vraisemblablement, l'entreprise doit contacter ses propres fournisseurs avant de fournir le prix exact pour 100 unités. Le prix sera probablement réduit à 40% du prix de l'unité²⁰.

Il est également probable que des économies d'échelle importantes caractérisent la production de Gfe. L'entreprise allemande a déjà acquis une certaine expérience dans la production en grandes quantités de leur petit HM. Cette expérience sera certainement valable dans le design et la commercialisation d'un module HM plus grand. Les contacts avec Gfe ont en plus révélé que l'entreprise doit prendre une décision stratégique concernant la production en série²¹. En effet au début de janvier nous avons reçu une lettre du Président de Gfe qui annonçait l'établissement d'une joint-venture avec Shell Hydrogen pour le développement et commercialisation des HM.

Plusieurs autres compagnies américaines sont présentes sur le net et – s'agissant souvent de *development companies* – elles sont très réticentes à donner des prix de leurs produits. Ces entreprises sont plus intéressées par des investisseurs dans des projets de développement technologique. Le contact chez Ovonic : agoddard@ovonic.com a montré une nette réticence à fournir des offres. Le site www.hydrogencomponents.com/stor.htm fournit une liste de prix pour différentes tailles de bonbonnes.

4. L'infrastructure

Dans cette partie nous allons détailler la démarche pour la réalisation d'un petit réseau de distribution d'hydrogène pour la recharge des HM à Genève. L'idée de base étant

¹⁸ Wurster R. *PEM Fuel Cells in Stationary and Mobile Applications* Ludwig-Bolkow Systemtechnik GmbH, 6th International Technical Congress – Biental de la Industria Eléctrica y Luminotécnica, Argentina, 1999.

¹⁹ G. Sandrock, "State of the art review of hydrogen storage in Metal Hydrides for military Fuel Cell applications" Final Report for the Department of Navy, Office of Naval Research. Contract N00014-97-M0001, July, 1997.

²⁰ Source: Hydrogen Components.

²¹ Il nous semble important de souligner que le choix peut être conditionné et encouragé par des projets comme le nôtre où secteur public et privé peuvent "assurer" une première infrastructure dans un cadre de pre-commercialisation.

de placer trois postes de remplissage à l'entrée de la ville sur des sites d'accès facile pour les propriétaires et locataires de jardins du Canton de Genève.

4.1 La recharge des hydrures métalliques

Pour définir un petit réseau de stations de recharge, nous avons contacté les producteurs d'hydrogène afin d'établir la disponibilité et le coût du combustible hydrogène et des stations de recharge. Nous pensions d'abord prendre en considération 4 possibilités distinctes pour la recharge de la bonbonne d'hydrures métalliques :

- 1) la recharge en self-service sur site ;
- 2) l'échange standard sur site ;
- 3) la recharge à domicile ;
- 4) l'échange standard à domicile.

L'option (3) est toutefois à exclure puisqu'il ne serait pas acceptable de garder un livreur de gaz chez le client pendant la recharge de la bonbonne. Il serait par contre souhaitable que dans la phase initiale le livreur puisse expliquer au consommateur la bonne démarche pour recharger l'HM en le familiarisant avec la nouvelle technologie.

La recharge sur site peut se faire à l'extérieur d'une grande surface (par ex. parking) dans une zone d'ombre avec un confinement léger pour minimiser le coût en génie civil (Section 4.3).

Dans l'étude de marché, le coût devra être évalué en tenant compte des marges commerciales des distributeurs et des diverses subventions et conditions de faveur qui pourraient réellement se présenter vu l'intérêt pour cette nouvelle technologie. Nous proposons en annexe une liste de contacts accompagnée d'une première évaluation.

4.2 L'hydrogène commercial en Suisse

L'entreprise CarbaGas, filiale de L'Air Liquide est un producteur et distributeur de gaz en Suisse. Lors des contacts établis, CarbaGas a montré un vif intérêt à participer à des projets ayant l'hydrogène comme combustible, puisque à présent l'hydrogène est surtout utilisé pour ses propriétés réductrices. L'entreprise livre 4 qualités de produit :

- Hydrogène technique : pureté 99.5 %
- Hydrogène qualité 40 : pureté 99.99
- Hydrogène qualité 45 : pureté 99.995
- Hydrogène qualité 50 : pureté 99.999

Remarquons à ce sujet qu'il y a une complication : les hydrures sont très sensibles à certaines impuretés (O, SO, SH) et pour ceci la qualité 50 est conseillée pour éviter tout danger de pollution de l'alliage qui engendre une désactivation (régénération possible, coût à vérifier).

Dans l'étude de marché il faudrait vérifier si une qualité inférieure d'hydrogène n'engendrerait pas un raccourcissement excessif de la durée de vie de l'HM. La gamme d'hydrogène comprimé commercial est donnée ci-dessous²²:

Hydrogène	Bonbonne	Coût (CHF/unité)	Coût par Nm ³ H ₂
Technique	B-10 2 Nm ³ H ₂	34	17
40	2		
45	2	40	20
50	2	88	
Technique	B-30 6 Nm ³ H ₂	52	8.66
40	6		
45	6	55	9.1
50	6	Non disp.	
Technique	B-50 10 Nm ³ H ₂	58	5.8
40	10		
45	10	76	7.6
50	10	175	17.5

Tableau 7 – H₂ commercial (CarbaGas®)

Les coûts en combustible de la tonte de gazon seront facilement déduits. Nous devons toutefois remarquer que ces prix peuvent être considérés comme des plafonds à cause du retour d'image pour CarbaGas.

4.3 La station pour la recharge des hydrures métalliques

Pour recharger l'hydrure il faut remplir la bonbonne à une pression d'env. 20 bars. En Suisse l'hydrogène commercial est livré en bonbonne sous haute pression et il faut une Centrale de Détente (CdD) afin de détendre le gaz de 200 à 20 bars.

Le groupe Alphagaz de CarbaGas offre le support technique nécessaire en matière de CdD. Il s'agit de produits certifiés, qui sont assemblés avec des pièces standard. Les différentes CdD sont conçues et optimisées pour chaque type de gaz et de pureté. Nous avons dès lors demandé des offres pour des CdD couramment utilisées pour deux qualités d'hydrogène.

- CdD pour Hydrogène de qualité technique env. CHF. 1500.
- CdD pour Hydrogène de qualité 50 env. CHF. 2900.

Ces stations de détente de CarbaGas sont visibles sur le site de la Compagnie à la page : <http://www.carbagas.ch/Carmatf/Kap.02/md0200.htm> Les CdD sont modulaires et peuvent être connectées à une, deux ou six bonbonnes à 200 bars.

Les responsables de CarbaGas nous ont clairement laissé comprendre qu'une application de ce genre pourrait bénéficier de conditions spéciales pour une question d'image, vraisemblablement également pour le coût de l'hydrogène. Finalement, nous

²² Prix hors TVA.

pouvons nous attendre à ce que CdD et hydrogène soient livrés (au plus) au prix de revient.

Il est à remarquer qu'il existe une autre entreprise qui livre de l'hydrogène à Genève : AGA, rte. du Bois-de-Bay 42 1242 Satigny.

4.4 Surfaces pour CdD

Nous pensons nous adresser d'abord aux grandes surfaces du Canton telles :

Migros (Acacias, Balexert,)

Jumbo

Coop

Remarques : Pour Migros et Coop un contact avec un responsable au niveau cantonal serait souhaitable. Si une de ces grandes surfaces est intéressée, elle exigera probablement un contrat en exclusivité.

Nous allons prendre en considération les stations d'essence des groupes Shell, BP et Agip.

Un site « naturel » est aussi celui de CarbaGas même, à la route des Jeunes.

5. Discussion

D'après les contacts établis jusqu'à ce jour, nous sommes en mesure de formuler les considérations suivantes.

La technologie des HM est au stade de la commercialisation pour des applications avec des FC ou des moteurs à combustion interne. La commercialisation devrait se concentrer dans un premier temps sur des « niches » de marché. De telles niches existent dans le cas où :

- la pollution chimique et/ou acoustique est perçue comme un élément crucial (disponibilité à payer)²³ ;
- il existe un grand différentiel entre la performance des HM vis-à-vis des technologies concurrentes en puissance et/ou énergie²⁴.
- la rapidité du temps de recharge par rapport aux batteries conventionnelles modifie la perception de l'application.

Les HM peuvent contribuer à l'introduction d'une mobilité électrique diffuse en ville. En effet, les HM peuvent changer structurellement l'usage des moyens de transport « légers » tels les vélos et les trottinettes hybrides ou les chaises pour handicapés dont la demande est en forte expansion. Ces systèmes sont maintenant propulsés par des batteries au plomb qui nécessitent plusieurs heures de recharge. Nous croyons que ce

²³ Si le bruit est pris en compte, il est certain que les HM bénéficieront de synergies avec le développement de la demande pour des systèmes FC. Un effet de mode peut également se déclencher.

²⁴ Dans les applications mobiles la densité de puissance (litres/kW) est un facteur essentiel et il sera possible de comparer des scooters HM-FC avec des produits à batteries existant sur le marché.

délai freine la mobilité électrique urbaine car, il empêche l'usage *intensif* des moyens de transport électriques. La disponibilité de bonbonnes d'HM et la présence des CdD « de quartier » peuvent, par contre définitivement libérer ces applications de la contrainte de temps de recharge, tout en baissant nettement les coûts de maintenance²⁵.

Il existe un potentiel pour des compagnies suisses en ce qui concerne la construction de la bonbonne et nous croyons que cela mérite une vérification lors de l'étude de marché.

Concernant le combustible, l'entreprise CarbaGas® s'est montrée très intéressée et pourrait livrer l'hydrogène et la station de recharge à des conditions favorables.

6. L'étude de marché

6.1 Motivation

L'évaluation technico-économique des coûts de la tondeuse à hydrogène n'est qu'une dimension permettant d'apprécier l'intérêt commercial de ce nouveau produit. L'analyse des coûts doit être complétée par une étude de marché visant à appréhender les autres déterminants de l'acceptabilité de ce produit par les consommateurs potentiels. Une telle étude permettra d'identifier les caractéristiques écologiques à mettre en évidence pour assurer le succès de la commercialisation du produit ainsi que la disponibilité à payer un surcoût selon les caractéristiques des différentes populations cible.

6.2 Démarche

Nous utiliserons une approche expérimentale développée pour les études de marché, appelée « analyse conjointe »²⁶. Cette approche permet de collecter des informations pertinentes pour évaluer l'acceptabilité d'un nouveau produit. Elle procède par une enquête par sondage dans la population des acheteurs potentiels dans le but d'observer leurs choix hypothétiques entre des produits alternatifs.

La réalisation d'une analyse conjointe se fait en cinq étapes.

- Dans la première étape on identifie les caractéristiques du produit soumis au choix, pertinentes pour la décision d'achat. Cette identification peut exiger un pré-sondage.
- Dans la seconde étape on assigne des niveaux à chaque caractéristique retenue, afin d'offrir des possibilités d'arbitrage entre les différentes caractéristiques du produit.
- Dans la troisième étape on définit un nombre réduit de scénarios à proposer aux individus enquêtés, issus du croisement entre les caractéristiques du produit et les

²⁵ Les bonbonnes d'HM ne sont pas dégradées par le *nombre* de cycles de recharge, mais par la qualité de l'hydrogène utilisé.

²⁶ Green, P. E. et V. Rao (1971), Conjoint Measurement for Quantifying Judgemental Data, *Journal of Marketing Research*, 8, pp. 355-63.

niveaux retenus dans l'étape précédente pour chaque caractéristique. Le nombre de scénarios envisagés doit être compatible avec les possibilités d'évaluation des individus enquêtés. Le coût du produit est inclus dans chaque scénario afin d'établir un lien entre toutes les alternatives proposées et, par là, d'évaluer la disponibilité à payer pour le produit.

- Dans la quatrième étape on réalise l'enquête pour observer les préférences des individus enquêtés par rapport aux alternatives proposées. Ces préférences sont exprimées sous forme d'un choix exclusif entre les alternatives proposées, d'un ordonnancement des alternatives ou encore d'une notation (« rating »).
- Dans la cinquième étape on analyse les données à l'aide d'un modèle économétrique qui permet d'évaluer l'utilité dérivée des caractéristiques du produit et d'en déduire la disponibilité à payer pour le produit en fonction du niveau de ses caractéristiques.

6.3 Organisation de l'enquête

Nous envisageons une enquête en deux vagues comportant une pré-enquête à début juin, effectuée lors des premières tontes. Cette pré-enquête sera réalisée par téléphone. Elle aura pour but de planifier la seconde vague d'enquête à effectuer à la fin de l'été. La seconde vague d'enquête comportera des interviews sur place afin de mieux comprendre la logique du consommateur vis-à-vis du produit et de la technologie.

7. Calendrier et budget

L'étude exige 9 mois de travail à plein temps. Les premiers trois mois seront consacrés à la recherche des informations technico-économiques : l'analyse de performance de la tondeuse, le coût des HM (en visitant les producteurs) et le coût d'infrastructure. Nous pensons nous rendre à la foire d'Hannover visiter les responsables de Gfè.

Le trimestre suivant sera consacré à l'élaboration des données récoltées ainsi qu'à la réalisation d'une petite unité de démonstration, à utiliser lors de l'enquête. Par la suite, nous réaliserons la première vague d'interviews en parallèle avec l'étude des conditions réelles de mise en place de l'infrastructure (législation, position politique du canton, centres pour la recharge, etc.).

Le troisième trimestre sera consacré à la réalisation de la seconde vague d'enquête, à l'analyse des résultats et à la rédaction du rapport final.

Le budget prévisionnel est le suivant :

9 mois assistant A1	CHF 56'000
Voyages	CHF 5'000
Frais CUEPE 15%	CHF 8'400
TVA 7,5%	CHF 5'200
Total	CHF 74'600