

L'ÉVALUATION MULTICRITÈRE COMME AIDE À L'ORIENTATION DE LA RECHERCHE : APPLICATION AUX TECHNOLOGIES DE STOCKAGE EMBARQUÉ DE L'HYDROGÈNE

Florent Montignac*, Vincent Mousseau, Denis Bouyssou, Sébastien Damart,
Mohammed Ali Aloulou, Benjamin Rousval

Résumé. – Il est aujourd'hui avéré que l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre est provoquée par l'utilisation intensive des combustibles fossiles carbonés depuis le début du 20^{ème} siècle. Dans ce contexte la recherche et le développement massif de nouveaux vecteurs énergétiques sont une nécessité, notamment dans le secteur des transports. L'hydrogène est un candidat potentiel qui pourrait se substituer aux combustibles carbonés fossiles. Cependant son déploiement à grande échelle comme carburant pour véhicules est confronté à plusieurs verrous technologiques parmi lesquels le stockage embarqué figure comme le plus difficile à lever. Trois voies technologiques sont envisagées pour stocker l'hydrogène à bord des véhicules : le stockage sous pression, le stockage liquide et le stockage solide. Chacune de ces technologies présente des avantages et inconvénients spécifiques qu'il est nécessaire d'appréhender afin de permettre aux décideurs et financeurs de la R&D d'orienter les investissements vers les voies les plus prometteuses. Cet article propose la mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation multicritère pour comparer les performances des technologies de stockage embarqué d'hydrogène. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet de recherche européen STORHY cofinancé par la Commission Européenne (projet du 6^{ème} PCRD).

Mots Clés : stockage de l'hydrogène, applications automobiles, évaluation multicritère, MACBETH

1. Introduction

L'utilisation des combustibles fossiles carbonés (charbon, gaz naturel, pétrole) dans les transports, l'habitat et l'industrie est à l'origine de la forte augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂), gaz à effet de serre, dans l'atmosphère terrestre depuis le début du siècle dernier, entraînant le réchauffement climatique global de notre planète [1]. Pour faire face à cet enjeu, il est urgent de développer de nouvelles technologies de l'énergie qui soient non émettrices de gaz à effet de serre. L'utilisation de l'hydrogène (H₂) comme vecteur énergétique pourrait contribuer à l'atteinte cet objectif. La conversion électrochimique de ce gaz par les piles à combustibles produit électricité, chaleur et vapeur d'eau. Sa combustion dans les moteurs thermiques produit chaleur et vapeur d'eau. L'utilisation de l'hydrogène par conversion électrochimique ou par combustion ne génère par conséquent aucune production de CO₂ d'origine fossile. Cependant, n'existant pas à l'état naturel sur Terre, l'hydrogène doit être produit industriellement. Dire que l'hydrogène est un vecteur énergétique totalement non générateur de gaz à effet de serre suppose que les procédés de production de l'hydrogène eux-mêmes ne génèrent pas d'émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène apparaît là encore comme un candidat d'avenir car sa production est envisageable à partir de nombreuses sources d'énergie primaire. Dans le cas d'une

* CEA LITEN, Département des Technologies de l'Hydrogène, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble
florent.montignac@cea.fr

production de l'hydrogène par électrolyse, l'apport d'électricité peut provenir d'énergie nucléaire, éolienne ou encore solaire photovoltaïque, énergies très peu émettrices de gaz à effet de serre. On voit donc que l'hydrogène, comme vecteur énergétique, présente de nombreux avantages environnementaux. Néanmoins, son déploiement massif dans les différents secteurs de la société se heurte aujourd'hui à un certain nombre de verrous technologiques. Nous traitons dans cette étude le cas particulier des applications automobiles, un des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre. L'usage de l'hydrogène comme carburant au sein des véhicules est un défi majeur à relever. Il se heurte à un certain nombre de verrous technologiques qui doivent être levés tels que la réduction du coût et l'augmentation de la durabilité des piles à combustibles, ainsi que le stockage embarqué de l'hydrogène. Les difficultés technologiques rencontrées pour permettre le stockage embarqué d'hydrogène proviennent des spécificités physicochimiques de ce gaz. L'hydrogène est en effet le gaz le plus léger existant. De fait, parmi tous les combustibles, il est celui qui présente la densité volumique d'énergie la plus faible aux conditions ambiantes de température et de pression. Afin de pouvoir envisager son stockage en quantité suffisante à bord des véhicules il y a nécessité d'augmenter cette densité volumique d'énergie. Pour cela, plusieurs voies technologiques sont étudiées : le stockage sous forme de gaz comprimé, le stockage sous forme de liquide cryogénique, et le stockage au sein de matériaux solides (hydrures métalliques, adsorption à la surface de matériaux carbonés...). Ces différentes voies technologiques présentent des caractéristiques, avantages et inconvénients spécifiques. La comparaison objective des différentes voies possibles est une des préoccupations des décideurs dans le domaine de l'hydrogène. C'est dans le cadre du projet Européen STORHY (6^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement) portant sur le stockage embarqué de l'hydrogène qu'une activité d'évaluation multicritère visant à comparer différentes technologies de stockage a été menée. Cet article présente la façon dont ces technologies ont été évaluées, notamment par la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation multicritère empruntée à la théorie de l'Aide à la Décision et la Recherche Opérationnelle. Les technologies de stockage embarqué d'hydrogène sont dans un premier temps présentées. Le contexte du projet de recherche Européen STORHY au cours duquel l'évaluation multicritère a été réalisée est ensuite décrit. Les résultats obtenus par la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation multicritère dans ce contexte sont enfin présentés et commentés.

2. Les technologies de stockage embarqué de l'hydrogène

2.1. Comment augmenter la densité volumique d'énergie de l'hydrogène ?

Comme le montrent la Figure 1 et le Tableau 1, par comparaison avec les combustibles carbonés, l'hydrogène est caractérisé par une densité massique d'énergie élevée (120 MJ/kg) et, dans les conditions standard de température et de pression, par une faible densité volumique d'énergie (11 MJ/m³).

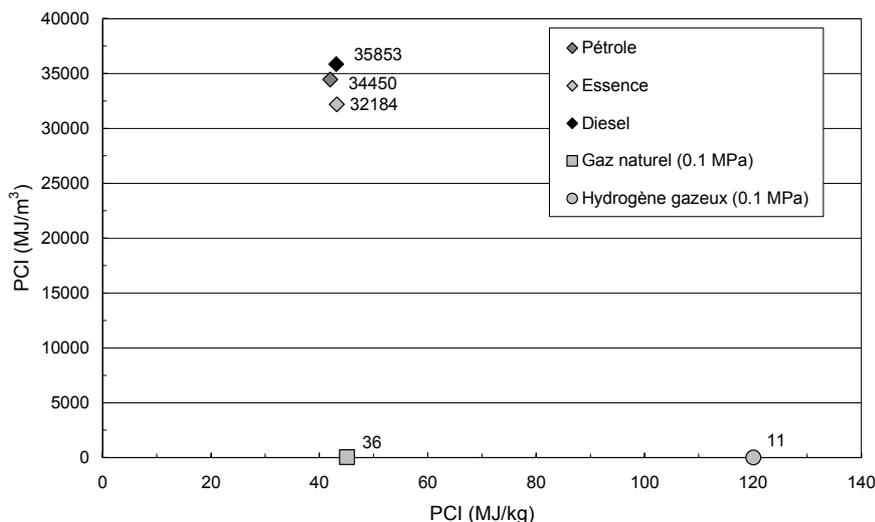


Figure 1 : Densités massique et volumique d'énergie de combustibles carbonés et de l'hydrogène.

Tableau 1 : Comparaison des densités massique et volumique d'énergie de combustibles carbonés et de l'hydrogène.

Combustibles	Pétrole	Essence	Diesel	Gaz naturel ^a	Hydrogène gazeux ^a
Densité volumique d'énergie (MJ/m ³)	34450	32184	35853	36	11
Densité massique d'énergie (MJ/kg)	42	43	42	45	120

^a(0,1 MPa)

Afin d'augmenter la densité volumique d'énergie de l'hydrogène et permettre son stockage à bord des véhicules, trois voies technologiques sont explorées : le stockage sous forme de gaz comprimé (35 MPa ou 70 MPa), le stockage sous forme de liquide cryogénique (20 K), le stockage dans des milieux solides (comme par exemple l'absorption dans des hydrures métalliques ou l'adsorption à la surface de matériaux carbonés poreux). Les paragraphes qui suivent donnent une description succincte de chacune de ces technologies.

2.2. Stockage sous pression

Le stockage sous pression de l'hydrogène pour applications automobiles est réalisé à 35 MPa (densité de l'hydrogène : 24 kg/m³, soit 2882 MJ/m³) ou 70 MPa (densité de l'hydrogène : 40,8 kg/m³, soit 4900 MJ/m³). Les réservoirs sont le plus souvent cylindriques. Les deux fonctions essentielles que doivent assurer ces réservoirs sont l'étanchéité et la tenue mécanique. La fonction d'étanchéité est assurée par une vessie interne (le « liner ») qui peut être soit métallique (réservoirs dits de type III), soit polymère (réservoirs dits de type IV). La fonction de tenue mécanique est assurée par le bobinage d'un matériau composite constitué généralement d'une matrice polymère thermodurcissable et de fibres de carbone. La Figure 2 représente un réservoir de stockage à 70 MPa développé par le CEA dans le cadre du projet Européen STORHY. A 70 MPa et 15 °C, ce réservoir contient un volume d'hydrogène gazeux de 37 litres, soit 1,5 kg d'hydrogène.



Figure 2 : Réservoir de stockage d'hydrogène à 70 MPa développé par le CEA dans le cadre du projet Européen STORHY. Le volume d'hydrogène stocké à 70 MPa et 15 °C est de 37 litres, correspondant à une masse de 1,5 kg d'hydrogène [2].

La Figure 3 représente un système de stockage à 70 MPa complet développé par la société Quantum. De nombreux constructeurs automobiles (General Motors, PSA, Ford, Daimler, Honda, Toyota...) ont développés des véhicules prototypes équipés de systèmes de stockage d'hydrogène sous pression. La Figure 4 donne une représentation schématique de l'intégration du système Quantum dans un véhicule prototype développé par General Motors.

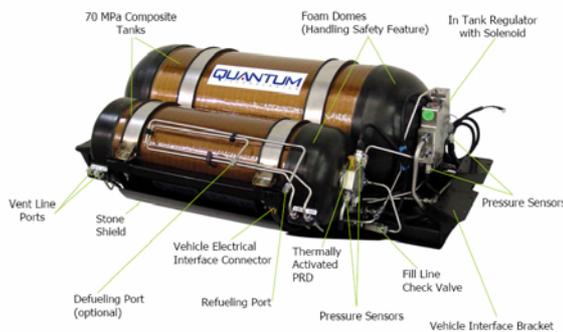


Figure 3 : Système de stockage d'hydrogène à 70 MPa développé par la société Quantum. La capacité de stockage de ce système est de 3,1 kg [5].



Figure 4 : Véhicule « HydroGen3 Compressed 700 » développé par General Motors [4].

2.3. Stockage liquide cryogénique

A pression atmosphérique, la température d'ébullition de l'hydrogène est de 20,3 K. A ce point, la masse volumique de la phase liquide est de 70,8 kg/m³ (soit une densité volumique d'énergie de 8496 MJ/m³).

L'enjeu principal du stockage d'hydrogène liquide cryogénique à bord des véhicules est la réduction des transferts de chaleur entre le milieu extérieur et l'intérieur du réservoir. La chaleur reçue par l'hydrogène liquide provoque sa vaporisation ce qui entraîne une augmentation de la pression interne. Afin d'éviter la rupture mécanique du réservoir, les systèmes de stockage sont dotés d'un dispositif qui maintient la pression inférieure à 1 MPa : lorsque ce seuil de pression est atteint, les vaporisations additionnelles d'hydrogène gazeux sont évacuées hors du système de stockage. Ainsi, en l'état actuel de la technologie, les systèmes de stockage d'hydrogène liquide cryogénique présentent un taux de pertes d'hydrogène de l'ordre de 3 % par jour, si bien qu'en un mois le réservoir se vide de son contenu si l'hydrogène n'est pas utilisé. L'isolation thermique des réservoirs d'hydrogène liquide est réalisée au moyen d'une structure à deux enveloppes cylindriques (en général métalliques) entre lesquelles est disposé un matériau « superisolant » constitué de feuilles métalliques réfléchissantes séparées par des intercalaires isolants. La mise au vide de l'espace entre les deux enveloppes cylindriques permet de limiter les échanges de chaleur par convection. Les principaux industriels développeurs de cette technologie sont Air Liquide, Linde et Magna Steyr. Des prototypes de véhicules utilisant ces systèmes de stockage sont développés par certains constructeurs automobiles (BMW, General motors, Ford, Daimler...). La Figure 5 donne une représentation schématique d'un système de stockage embarqué d'hydrogène liquide développé par Linde. La Figure 6 représente l'intégration d'un système de stockage d'hydrogène liquide dans l'architecture d'une BMW Série 7 Hydrogène.

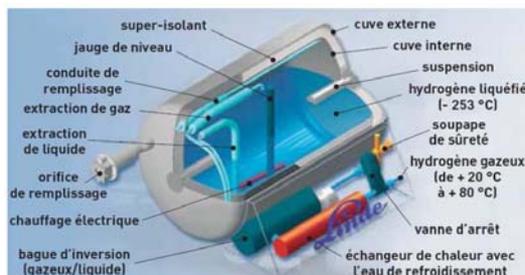


Figure 5 : Représentation schématique d'un réservoir d'hydrogène liquide du fabricant Linde [3].



Figure 6 : Véhicule développé par BMW (« Hydrogen 7 series ») équipé d'un système de stockage d'hydrogène liquide disposé dans le coffre [6].

2.4. Stockage solide

On peut distinguer trois familles principales de matériaux permettant le stockage solide de l'hydrogène : les hydrures métalliques réversibles (LaNi_5H_6 , FeTiH_2 , Mg_2NiH_4 ...), les hydrures complexes (NaAlH_4 , LiAlH_4 , NaBH_4 ...), les matériaux poreux tels que les nanotubes de carbone et les zéolites. Les hydrures font aujourd'hui l'objet de développements de systèmes de stockage intégrés à des véhicules prototypes, tandis que le stockage d'hydrogène au sein des matériaux poreux n'est qu'au stade de la recherche de laboratoire à l'échelle du matériau. Nous exposons ci-après brièvement les principes du stockage d'hydrogène au sein des hydrures. Pour plus d'informations aux sujet du stockage d'hydrogène dans les matériaux poreux, on pourra se référer à [7] et [10].

Dans le cas des hydrures métalliques réversibles et des hydrures complexes, le stockage est réalisé par absorption de l'hydrogène. La molécule H_2 est dans un premier temps dissociée en deux atomes H à la surface du matériau puis les atomes diffusent au sein du réseau cristallin, formant une nouvelle phase solide. L'absorption de l'hydrogène s'accompagne d'un dégagement de chaleur tandis que la désorption nécessite un apport de chaleur du milieu extérieur. L'équation générale du mécanisme d'hydruration (formation de la phase 'hydrure') est donnée ci-après. La Figure 7 illustre schématiquement le mécanisme. Le diagramme 'Pression-Composition-Température' représenté montre l'évolution caractéristique de la pression en fonction du taux d'hydruration et fait apparaître le mécanisme de changement de phase.

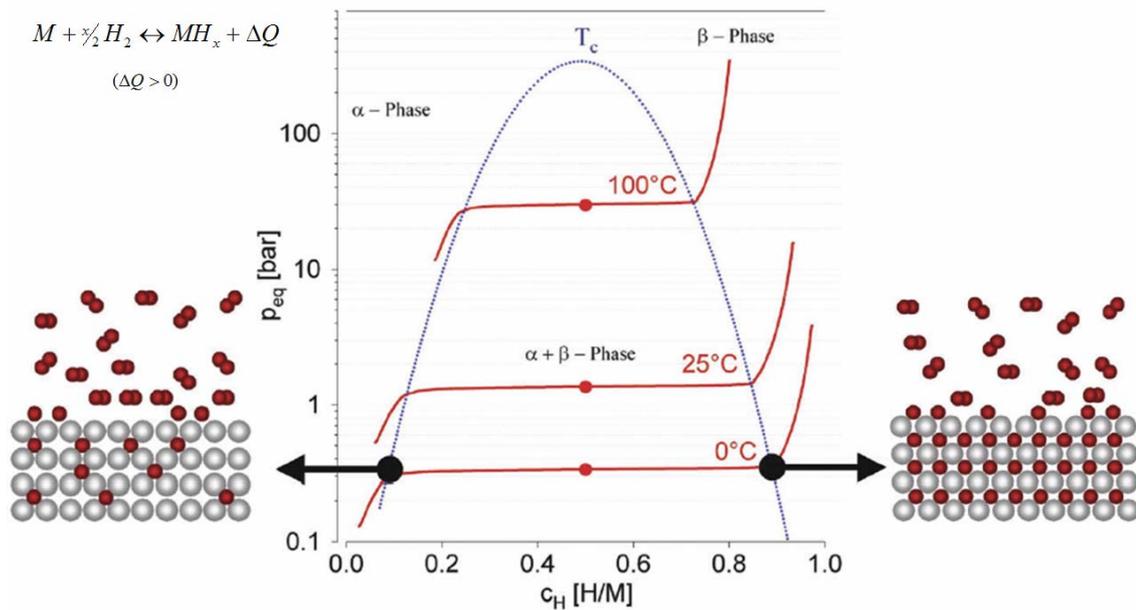


Figure 7 : Représentation schématique et diagramme PCT caractéristique du mécanisme d'hydruration [7].

Des réservoirs de stockage solide intégrés aux véhicules et utilisant les hydrures métalliques réversibles ou les hydrures complexes sont en cours de développement. TOYOTA et Daimler sont les principaux constructeurs automobiles ayant développé et utilisé ce type de systèmes dans des véhicules prototypes. A titre d'exemple, la Figure 8 représente un réservoir de stockage solide d'hydrogène développé par TOYOTA. Ce réservoir contient un échangeur de chaleur à ailettes qui permet d'évacuer et de fournir la chaleur nécessaire au matériau lors des phases d'absorption et de désorption de l'hydrogène respectivement. La Figure 9 représente l'intégration de réservoirs de stockage solide développés par la société Ovonix, dans l'architecture d'une TOYOTA Prius modifiée adaptée pour fonctionner à l'hydrogène.

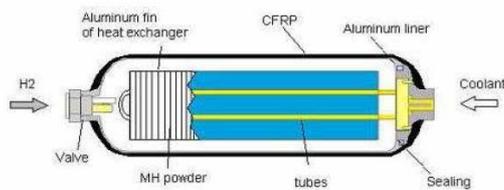


Figure 8 : Réservoir de stockage solide développé par le constructeur automobile TOYOTA. L'hydrure employé est de type TiCrMn [8].



Figure 9 : Intégration de 2 réservoirs de stockage utilisant les hydrures métalliques développés par la société Ovonix disposés dans le châssis d'une TOYOTA Prius [11].

Le stockage d'hydrogène par l'utilisation d'hydrures présente l'avantage de fonctionner à des températures proches de l'ambiante et à des pressions généralement inférieures à 10 MPa. Un des points durs de cette technologie réside dans la masse élevée des systèmes de stockage (environ 60 fois la masse d'hydrogène stocké) qui sont à l'heure actuelle 3 fois plus lourds que les systèmes de stockage sous pression et cryogénique (environ 20 fois la masse d'hydrogène stocké). En contrepartie, le stockage solide offre une densité volumique d'énergie meilleure que le stockage sous pression et comparable à la performance du stockage liquide (à l'échelle du matériau, les hydrures offrent des densités volumique d'énergie de l'ordre de 12000 MJ/m³). La gestion des échanges thermiques et le remplissage rapide des réservoirs constituent également une problématique pour le stockage solide de l'hydrogène. Les travaux de recherche portent actuellement sur la synthèse et la caractérisation de nouveaux matériaux légers adaptés au stockage d'hydrogène ainsi que sur l'amélioration des cinétiques d'absorption et de désorption à l'échelle du matériau et à l'échelle du réservoir. Pour plus d'informations au sujet du stockage solide de l'hydrogène (hydrures, matériaux poreux), on pourra se référer à [7], [8], [9], [10], [11][12] et [13].

2.5. *Comment comparer les technologies de stockage embarqué d'hydrogène ?*

Comme cela vient d'être succinctement présenté, le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules peut être envisagé sous différentes formes : stockage sous pression, stockage à l'état liquide cryogénique, stockage solide. Ces technologies sont aujourd'hui en compétition pour satisfaire aux exigences des constructeurs automobiles. A l'heure où des orientations de Recherche et Développement sont à définir pour résoudre la problématique du stockage embarqué d'hydrogène, la pertinence des systèmes de stockage d'hydrogène développés doit être évaluée, tant sur le plan de leur potentiel technique à satisfaire au cahier des charges automobile, que sur les plans économiques, environnementaux et relativement à la sécurité. En outre, le choix d'une technologie de stockage embarqué d'hydrogène implique de disposer, à la station service, d'hydrogène qui soit conditionné de manière adéquate pour le système de stockage (compression, liquéfaction). Ce conditionnement de l'hydrogène induit des consommations énergétiques et de coûts de mise en œuvre spécifiques qu'il est par conséquent nécessaire de prendre en compte dans la comparaison des modes de stockage embarqué étudiés.

On constate ainsi que la multiplicité des attributs (performances, impacts, niveau de maturité technologique) relatifs à chaque mode de stockage embarqué confère un certain degré de complexité à la problématique d'évaluation et de comparaison de ces technologies. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation multicritère peut apporter un éclairage intéressant en définissant un cadre de travail structuré et des outils d'évaluation adaptés. C'est précisément l'objet des chapitres suivants qui présentent une synthèse des travaux effectués au cours du projet Européen STORHY (« Hydrogen Storage Systems for Automotive Application »). Ce projet a rassemblé pendant 4 ans 34 acteurs Européens de la recherche et de l'industrie autour de cette problématique du stockage embarqué de l'hydrogène. Le Chapitre 3 présente le contexte général du projet STORHY, le Chapitre 4 rappelle les fondamentaux théoriques des méthodes multicritères puis le Chapitre 5 expose la démarche et les résultats d'évaluation obtenus à l'issue du projet STORHY.

3. Contexte général de l'évaluation : le projet Européen STORHY

3.1. *Le projet STORHY*

Les travaux présentés dans cette étude ont été menés dans le cadre du projet de recherche Européen STORHY « Hydrogen Storage Systems for Automotive Application », faisant intervenir 34 partenaires (constructeurs automobiles, sous-traitants du secteur automobile, universités, centres de recherche) de 13 pays européens. Le projet a débuté en Mars 2004 et s'est achevé en Août 2008. L'objectif principal de ce projet a été de développer des technologies de stockage embarqué d'hydrogène en se focalisant sur (i) le stockage sous pression à 70 MPa, (ii) le développement de systèmes de stockage d'hydrogène liquide réalisés en matériaux composites, et (iii) la recherche et la mise en œuvre de nouveaux matériaux de stockage solide de l'hydrogène (hydrures complexes). En complément de ces activités de développements technologiques, la définition des cahiers des charges automobiles, l'évaluation de la sécurité des systèmes et l'évaluation multicritère des performances des prototypes développés ont été planifiés. Pour mener à bien ces objectifs, 6 « sous projets » (SP) ont été définis (Figure 10) :

- 3 « sous projets » dédiés au développement technologique des systèmes de stockage embarqué d'hydrogène
 - o SP « Pressure » : développement de systèmes de stockage sous pression fonctionnant à 70 MPa,
 - o SP « Cryogenic » : développement de nouveaux systèmes de stockage liquide utilisant les matériaux composites,
 - o SP « Solid » : développement de nouveaux matériaux (hydrures complexes) pour le stockage solide de l'hydrogène.
- 3 « sous projets » dédiés à des activités transverses :
 - o SP « Users » : définition des cahiers des charges par les constructeurs automobiles,
 - o SP « Safety » : évaluation de la sécurité des systèmes de stockage développés,
 - o SP « Evaluation » : évaluation multicritère des technologies de stockage embarqué développées.

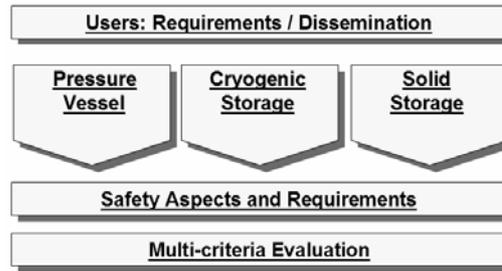


Figure 10 : Structure du projet Européen STORHY [14].

3.2. Le sous projet « Evaluation »

L'objectif du sous projet « Evaluation » a été de comparer les technologies de stockage dans leur ensemble, c'est-à-dire en prenant en compte l'intégralité des attributs (performances et impacts) liés à chacune des voies technologiques. Dans une optique de développement durable, la comparaison entre technologies en développement ne peut pas se limiter à l'étude des performances techniques. Ainsi, dans le cadre du projet STORHY, cinq domaines d'évaluation ont été pris en considération : les performances techniques (satisfaction du cahier des charges automobile), les coûts de fabrication, la sécurité, les impacts environnementaux (cycle de vie du système de stockage et pertes énergétiques de la filière hydrogène correspondante) et l'acceptabilité sociale (perception du public vis-à-vis des technologies de stockage). Dans cet article nous traitons en particulier l'étude des performances techniques. Nous présentons par la suite la mise en œuvre d'une méthode multicritère adaptée à ce point particulier. Avant d'entamer la présentation de la démarche et des résultats obtenus, le Chapitre 4 expose quelques éléments théoriques fondamentaux sur les méthodes multicritères.

4. Eléments théoriques sur les méthodes multicritères

4.1. Aide multicritère à la décision et aide multicritère à l'évaluation

L'aide à la décision est une discipline qui repose sur le constat que la complexité et l'importance des problèmes de gestion rencontrés dans de nombreuses organisations conduisent parfois à rechercher une « préparation scientifique » des décisions [15]. La personne d'étude chargée d'une telle préparation est, en pratique, confronté à des tâches nombreuses et variées : identification des acteurs concernés, formulation du problème, élaboration d'une liste d'actions possibles, définition d'un ou plusieurs critères d'évaluation de ces actions, collecte d'informations, analyses de sensibilité, élaboration de recommandations. Ce travail est souvent compliqué du fait de la volonté ou de la nécessité de prendre en compte des points de vue ou des critères conflictuels pour évaluer les actions ; on parle alors d'**aide multicritère à la décision**. Depuis les années 60, l'aide multicritère à la décision est une discipline qui fait l'objet d'une importante recherche théorique et donne lieu à l'élaboration d'un grand nombre de méthodes mathématiques et d'outils qui trouvent leur application dans des domaines variés : finance, planification énergétique, aménagement et transports, conception de réseaux de télécommunication, etc. Ces méthodes multicritères visent à porter un jugement relatif (une alternative est « meilleure » qu'une autre) ou absolu (une alternative est « bonne ») en prenant en compte la diversité des conséquences d'une alternative complexe et en interagissant avec les acteurs qui sont affectés par les conséquences du choix des alternatives [16]. Un état de l'art exhaustif de ces méthodes et outils est rassemblé dans [17]. L'activité d'aide multicritère à la décision suppose qu'une demande soit formulée initialement par un décideur ou un groupe de décideurs qui sollicite la compétence d'une personne d'étude ou groupe d'étude pour l'éclairer face à une situation complexe. On préfère parler d'**aide multicritère à l'évaluation** lorsque l'objectif de l'étude est d'éclairer les points positifs et négatifs des alternatives identifiées sans que cela mène à un choix définitif de l'une ou l'autre des alternatives et lorsque aucun décideur n'est clairement identifié. C'est le cas dans le projet de Recherche Européen STORHY au sein duquel on cherche à identifier les avantages et inconvénients de chacune des technologies envisagées pour le stockage embarqué d'hydrogène sans pour autant choisir « la » technologie de stockage à privilégier. L'objectif dans ce projet est d'identifier les efforts de Recherche qu'il reste à accomplir pour chacune des technologies et selon plusieurs points de vue.

4.2. Processus d'évaluation multicritère

4.2.1. Démarche générale

Toute démarche d'évaluation multicritère suit un processus systématique, quel que soit le cadre de sa mise en œuvre, constitué de trois étapes : la structuration du problème d'évaluation, le développement d'un modèle d'évaluation, l'élaboration de recommandations. Une vue d'ensemble du processus d'évaluation est donnée en Figure 11. Le contenu de chacune de ces étapes est présenté ci-après.

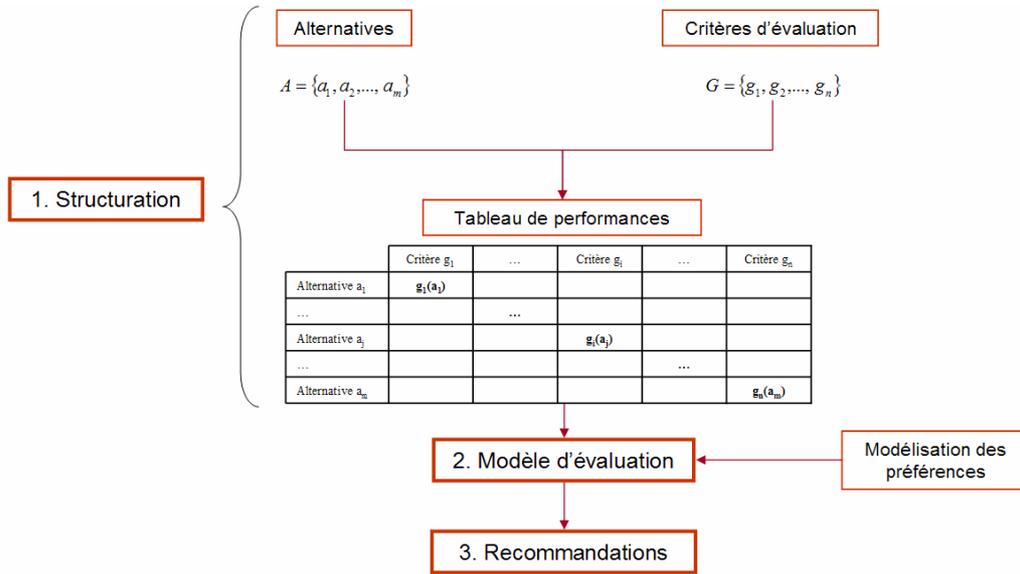


Figure 11 : Vue d'ensemble des étapes qui interviennent dans un processus d'aide à la décision multicritère.

4.2.2. Structuration

La phase de **structuration** a pour but de définir le cadre général de l'étude. On décrit les alternatives évaluées, les frontières de l'évaluation, les critères d'évaluation, les performances des alternatives étudiées. C'est également au cours de cette phase que l'on cherche à identifier l'ensemble des acteurs susceptibles d'intervenir dans le processus d'évaluation (décideurs, experts, utilisateurs...). On note $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ l'ensemble des alternatives et $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ l'ensemble des critères d'évaluation. On suppose que pour chaque critère g_i on dispose d'éléments permettant de donner une valeur à chacune des alternatives. On note $g_i(a_j)$ l'évaluation de l'alternative a_j sur le critère g_i . La base de travail sur laquelle repose le processus d'évaluation est le **tableau de performances** que l'on obtient (Tableau 2). Chaque critère est exprimé dans une unité qui lui est propre. Les valeurs $g_i(a_j)$ ne doivent pas nécessairement être regardées comme des données "précises". Elles peuvent n'être que des ordres de grandeurs qui résultent de l'état actuel des connaissances. Les critères peuvent être de nature quantitative (volume, masse, prix net...) ou qualitative (conformabilité du système, qualité de service...).

Tableau 2 : Tableau de performances représentant les performances $g_i(a_j)$ des m alternatives évaluées sur chacun des n critères d'évaluation.

	Critère g_1	...	Critère g_i	...	Critère g_n
Alternative a_1	$g_1(a_1)$	...	$g_i(a_1)$	...	$g_n(a_1)$
...
Alternative a_j	$g_1(a_j)$	...	$g_i(a_j)$	...	$g_n(a_j)$
...
Alternative a_m	$g_1(a_m)$	...	$g_i(a_m)$	...	$g_n(a_m)$

4.2.3. Modèle d'évaluation

La phase de développement du **modèle d'évaluation** vise à exploiter les éléments obtenus à l'issue de la phase de structuration pour bâtir un modèle permettant de répondre aux questions posées. La construction d'un modèle d'évaluation tient compte à la fois des performances attribuées à chacune des alternatives sur l'ensemble des critères et des préférences qui peuvent être formulées par les acteurs concernés par l'étude. Par « préférences » on entend le jugement porté par un acteur sur les performances (quantitatives ou qualitatives) de chaque alternative évaluée, ainsi que le jugement de valeur porté sur l'importance relative des critères. Il existe un grand nombre de méthodes multicritères permettant de traiter l'information contenue dans le tableau de performances et de modéliser les préférences. On distingue deux grandes familles de méthodes multicritères [18] :

- les méthodes ordinales (ou méthodes de surclassement), qui reposent sur l'agrégation des ordres induits par les valeurs de performance des alternatives,
- les méthodes cardinales (ou méthodes du critère unique de synthèse), qui visent à agréger l'information sous la forme d'une échelle unique à partir des valeurs de performance des alternatives,

Dans le cas des **méthodes ordinales** on suppose que la seule information réellement fiable et que l'on peut exploiter est l'ordre induit par les valeurs de performance des alternatives sur chacun des critères. L'agrégation de l'information contenue dans le tableau de performances se traduit dans ce cas par l'agrégation des ordres entre les alternatives évaluées. On appelle aussi ces méthodes « méthodes de surclassement ». Les méthodes mathématiques ordinales telles que les méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) sont souvent utilisées lorsqu'il existe une forte hétérogénéité dans les évaluations des différents critères (par exemple, la durée, le bruit, la distance, le coût, les sites culturels...) et lorsqu'un nombre important de critères est pris en compte (supérieur à cinq). Ces méthodes sont appliquées dans de nombreux domaines comme l'environnement, l'énergie, la sélection de projets ou encore les transports. On pourra se référer à [19] pour une description théorique complète de ces méthodes et des exemples d'application.

Dans le cas de l'**approche « cardinale »**, on cherche à construire une échelle unique ou critère synthétique en réalisant une somme d'évaluations. L'idée fondamentale des approches cardinales (également appelées « fonctions de valeur additives ») est de remplacer les échelles « brutes » g_i utilisées sur chacun des critères i par de nouvelles échelles v_i . L'agrégation des critères est alors réalisée en attribuant à chacune des échelles des « poids » où « constantes d'échelles » w_i et en effectuant une somme pondérée sur l'ensemble des critères d'évaluation. Techniquement, on agrège les n critères par une formule du type :

$$v(a_j) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(g_i(a_j))$$

Les fonctions de valeur additives ont ainsi pour but de convertir toutes les échelles de mesure en une échelle unique qui mesure les préférences. Rendre opérationnel un tel modèle suppose de proposer une manière de questionner les acteurs qui permette de déterminer les fonctions v_i et les constantes d'échelles w_i . Il existe de nombreuses méthodes pour cela. Pour une présentation exhaustive des fondamentaux théoriques et des cas d'application de ces méthodes on pourra se référer à [17].

En résumé, on choisira préférentiellement une approche ordinale lorsque de nombreux critères de natures diverses seront à prendre en compte, alors que l'on préférera une approche cardinale lorsque l'on souhaitera une exploitation fine des performances « brutes » des alternatives sur chacun des critères.

4.2.4. Recommandations

Lorsque l'on parvient à bâtir un modèle d'évaluation prenant en compte les performances des alternatives sur chaque critère et les préférences des acteurs concernés par l'étude, on est alors en mesure de connaître l'attractivité de chacune des alternatives dans le contexte qui a été défini. La personne d'étude est alors à même d'établir des **recommandations** en faisant le lien avec les hypothèses formulées au commencement de l'étude et les hypothèses rattachées aux calculs de performances des alternatives. La robustesse des résultats est évaluée par le biais d'études paramétriques de sensibilité réalisées en faisant varier les paramètres qui auront nourri la construction du modèle (performances des alternatives,

préférences des acteurs). Un modèle d'évaluation doit être utilisé et interprété avec beaucoup de rigueur. En effet :

- sa construction repose toujours sur un ensemble d'hypothèses auxquelles il faut se référer,
- il amène à manipuler des informations qui peuvent être amenées à évoluer,
- on notera enfin que le modèle développé auprès d'un acteur particulier peut donner des résultats qui ne concordent pas avec celui développé pour un autre acteur du fait de l'introduction de « préférences ».

4.2.5. En résumé

La théorie de l'aide à la décision multicritère procure des méthodes et outils qui ont pour but de rationaliser les évaluations entre alternatives à un problème donné. Nous venons d'en voir les principaux fondamentaux théoriques. Le Chapitre suivant décrit le choix et la mise en œuvre de la méthode multicritère qui a été retenue dans le cadre du projet Européen STORHY. Les résultats obtenus sont présentés et commentés.

5. Mise en œuvre de la méthode multicritère MACBETH pour l'évaluation et la comparaison des performances techniques de technologies de stockage embarqué d'hydrogène

5.1. Structuration

L'approche et les résultats communiqués dans les paragraphes suivants correspondent à l'implémentation de la méthode d'évaluation auprès d'un des constructeurs automobiles du projet Européen STORHY. Au cours de cette implémentation, trois alternatives (technologies de stockage d'hydrogène) ont été comparées : un système de stockage comprimé de type IV (vessie polymère) fonctionnant à 70 MPa (noté C-H₂), un système de stockage d'hydrogène liquide (noté L-H₂) et un système de stockage solide (noté Solide). L'application finale qui a été prise en considération dans cette étude est un véhicule équipé d'une pile à combustible et ayant un système de stockage d'une capacité de 6 kg d'hydrogène. L'évaluation s'est focalisée sur 5 critères d'évaluation : le volume du système (l), la masse du système (kg), le temps de remplissage du système (min), le taux de pertes d'hydrogène (g/h/kg_{H2}) et la conformabilité (sans dimension). La conformabilité est définie comme la capacité du système à intégrer l'architecture existante d'un véhicule. Les performances des technologies de stockage prises en compte dans l'étude sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Tableau de performances pris en considération pour l'évaluation de trois technologies de stockage d'hydrogène, dans le cas spécifique d'un véhicule pile à combustible et pour une capacité de stockage de 6 kg d'hydrogène.

Technologies	Volume du système (l)	Masse du système (kg)	Temps de remplissage (min)	Taux de pertes d'hydrogène (g/h/kg _{H2})	Conformabilité (qualitatif)
C-H ₂ ^a	250	133	4	0	--
L-H ₂ ^b	167	100	2	1.3	---
Solide ^c	250	500	15	0	-

^asystème de type IV (vessie en polymère) fonctionnant à 70 MPa

^bsystème cylindrique réalisé en matériaux métalliques

^csystème de stockage solide utilisant les hydrures métallique « basse température »

Le choix de ces critères d'évaluation et de ces performances a été réalisé en concertation avec les constructeurs automobiles du projet STORHY. Il s'agit là du « matériau de base » sur lequel repose l'évaluation multicritère.

Avant de procéder à l'élaboration d'un modèle d'évaluation s'est posée la question du type de méthode multicritère à mettre en œuvre. Les caractéristiques qui ont été identifiées pour le choix d'une méthode appropriée ont été les suivantes :

- la méthode devait permettre d'exploiter les résultats techniques du projet STORHY ; les performances techniques quantitatives devaient pouvoir être modélisées par la méthode,
- les performances obtenues au cours du projet devaient pouvoir être comparées à l'état de l'art et aux objectifs tels que ceux fixés par l'Union Européenne,

- la méthode devait permettre l'identification des critères sur lesquels des efforts de recherche devaient être menés, pour chacune des technologies évaluées.

Compte tenu de ces objectifs, le choix s'est porté vers une méthode de type cardinale. Comme nous l'avons vu au Chapitre précédent, ce type de méthodes permet une exploitation fine des performances techniques obtenues par les technologies, tandis qu'une méthode de type ordinal n'aurait pris en considération que l'ordre induit par les performances. Parmi les nombreuses méthodes cardinales existantes, c'est la méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) qui a été choisie [20]. Les principes de cette méthode sont exposés ci-après.

5.2. Modèle d'évaluation

5.2.1 Principes généraux de la méthode MACBETH :

Les principes sur lesquels s'appuie la méthode cardinale MACBETH sont les suivants :

- Pour chacun des critères d'évaluation, les performances des technologies sont positionnées par rapport à deux niveaux de référence. Le premier, appelé niveau « neutre » ou « acceptable », est un niveau de performance en dessous duquel des efforts de recherche importants doivent être fournis pour permettre l'adoption de la technologie. Le second, appelé niveau « bon » ou « satisfaisant », est un niveau de performance au-delà duquel la recherche pour améliorer la performance de la technologie selon le critère étudié n'est plus prioritaire. L'utilisation de ces niveaux de référence est centrale dans cette méthode car elle permet d'obtenir un modèle d'évaluation donnant à la fois des informations absolues (positionnement des technologies par rapport à des niveaux de références) et des informations relatives (classement des technologies sur chaque critère). Le positionnement de ces niveaux de référence pour chacun des critères a été réalisé dans cette étude auprès d'un constructeur automobile du projet STORHY. La Figure 12 illustre schématiquement la signification des niveaux de référence, et la Figure 13 donne l'exemple de niveaux de référence choisis pour le critère « volume du système ».
- Les écarts numériques de performance entre technologies sont traduits en terme de « différences d'attractivité ». Cette technique permet de prendre en compte la non linéarité éventuelle du jugement porté par les acteurs interrogés sur ces écarts de performance.
- La méthode est accompagnée d'un logiciel interactif convivial (logiciel M-MACBETH) qui guide le processus d'évaluation multicritère (définition des critères, positionnement des technologies, différences d'attractivité entre technologies, résultats graphiques, détermination des constantes d'échelle, agrégation).

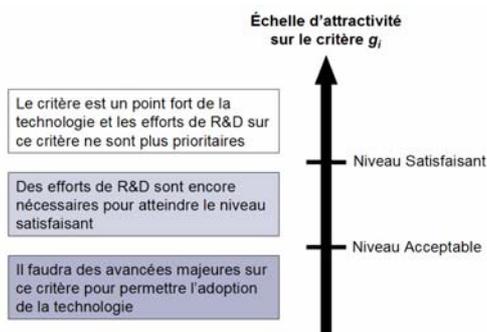


Figure 12 : Définition des niveaux de référence dans le cadre de l'utilisation de MACBETH pour l'évaluation des performances techniques des technologies de stockage embarqué de l'hydrogène.

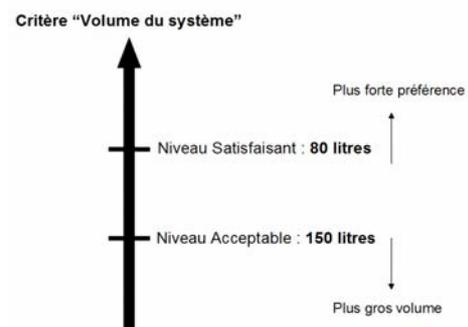


Figure 13 : Exemple de valeurs attribuées aux niveaux « acceptable » et « satisfaisant » pour le critère « Volume du système ».

La partie suivante expose la façon dont les fonctions de valeur ont été construites à partir des informations recueillies auprès du constructeur automobile interrogé.

5.2.2 Construction des fonctions de valeur

- Niveaux de référence « acceptable » et « satisfaisant » pris en considération dans l'étude :

La première phase dans le processus de construction des fonctions de valeur MACBETH consiste à définir les niveaux « acceptable » et « satisfaisant » pour chacun des critères d'évaluation. Le Tableau 4 donne les valeurs qui ont été prises en considération par le constructeur automobile interrogé pour les niveaux « acceptable » et « satisfaisant » sur chacun des critères d'évaluation et dans le cadre de l'application automobile considérée.

Tableau 4 : Ensemble des valeurs attribuées par le constructeur automobile interrogé pour les niveaux « acceptable » et « satisfaisant » sur chacun des critères d'évaluation et dans le cadre de l'application automobile considérée dans l'étude.

	Volume du système (l)	Masse du système (kg)	Temps de remplissage (min)	Taux de pertes d'hydrogène (g/h/kg _{H2})	Conformabilité (qualitatif) ^a
Satisfaisant	80	100	4	0	«Bonne»
Acceptable	150	200	8	0.04	«Mauvaise»

^aUne « bonne » conformabilité signifie que le système peut facilement être incorporé à l'architecture du véhicule, tandis qu'une « mauvaise » conformabilité signifie que le système de stockage est une contrainte pour le design du véhicule.

- Rangement des alternatives par ordre de préférence sur chacun des critères :

A partir des informations du tableau de performance et des niveaux de référence choisis par le constructeur automobile interrogé, le rangement par ordre de préférence sur chacun des critères a pu être obtenu (Tableau 5).

Tableau 5 : Rangement des technologies de stockage d'hydrogène évaluées en regard avec les niveaux de référence exprimés par le constructeur automobile interrogé.

Volume du système (l)	Masse du système (kg)	Temps de remplissage (min)	Taux de pertes d'hydrogène (g/h/kg _{H2})	Conformabilité (qualitatif)
SAT (80)	SAT = L-H₂ (100)	L-H₂ (2)	SAT = C-H₂ = Solide (0)	SAT («Bonne»)
ACC (150)	C-H₂ (133)	SAT = C-H₂ (4)	ACC (0.04)	ACC («Mauvaise»)
L-H₂ (167)	ACC (200)	ACC (8)	L-H₂ (1.3)	Solide
C-H₂ = Solide (250)	Solide (500)	Solide (15)		C-H₂
				L-H₂

- Différences d'attractivité entre alternatives :

Le processus d'évaluation MACBETH se poursuit avec l'évaluation des différences d'attractivité entre alternatives. Cette méthode est utilisée par le logiciel afin de traduire chacune des échelles physiques en de nouvelles « échelles d'attractivité » qui auront toutes la même unité. Le constructeur automobile interrogé a ainsi formulé ses jugements en termes de différences d'attractivité entre alternatives sur chacun des critères. La Figure 14 illustre cette étape dans le cas du critère « volume du système ». L'acteur interrogé a le choix entre sept catégories sémantiques pour qualifier la différence d'attractivité entre deux alternatives : « pas de différence », « très faible », « faible », « modérée », « forte », « très forte », « extrême ». L'utilisateur peut également hésiter entre deux catégories (par exemple : « faible à très faible »). Les jugements de l'acteur interrogé sur le critère étudié sont collectés par l'intermédiaire d'une matrice dite « matrice des différences d'attractivité ». La figure 9 procure la matrice des différences d'attractivité obtenue auprès du constructeur automobile interrogé et dans le cas du critère « volume du système ».

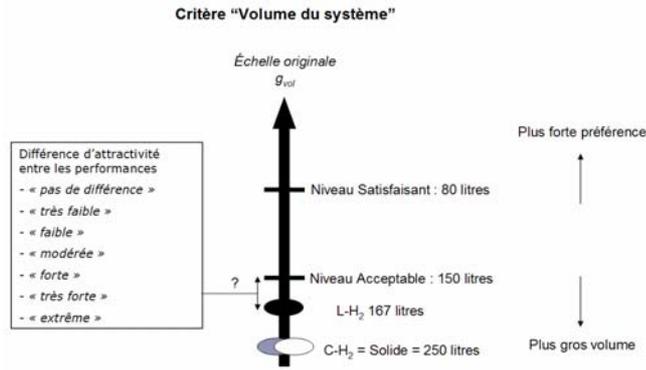


Figure 14 : Le constructeur automobile est interrogé sur sa perception des écarts de performance entre technologies, exprimée en terme de « différence d'attractivité » entre les performances.

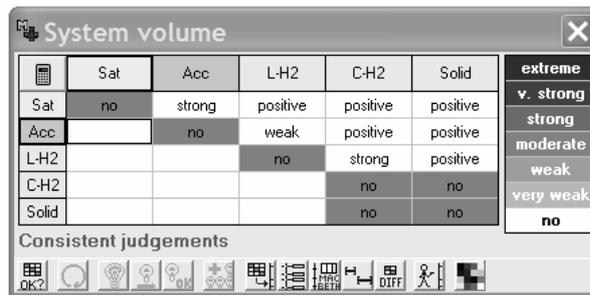


Figure 15 : Matrice des différences d'attractivité obtenue auprès du constructeur automobile interrogé, dans le cas du critère « volume du système ».

• Obtention des fonctions de valeur :

A partir de cette information, le logiciel M-MACBETH construit une nouvelle échelle numérique automatiquement, en positionnant le niveau « acceptable » à 0 et le niveau « satisfaisant » à 100. Ces échelles sont construites par le logiciel de manière à ce que les contraintes modélisées dans les matrices d'attractivité au travers des jugements soient respectées. Les valeurs numériques proposées par le logiciel représentent une des solutions numériques possibles qui satisfasse aux informations qualitatives fournies dans la matrice. L'échelle obtenue est donc une échelle « normalisée » appelée également « échelle MACBETH ». La Figure 16 illustre la notion d'échelle normalisée dans le cas particulier du critère « volume du système ».

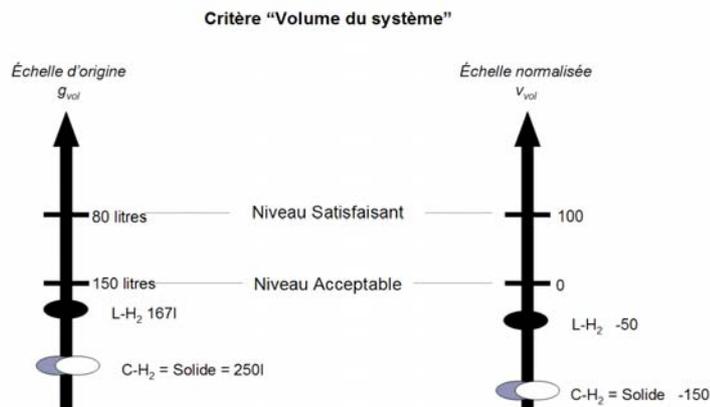


Figure 16 : Illustration du passage de l'échelle d'origine à l'échelle normalisée obtenue après la saisie des différences d'attractivité entre technologies au travers de la matrice des différences d'attractivité.

• Profils de performance :

A l'issue de ce processus, le logiciel M-MACBETH permet d'obtenir les « profils de performance » de chacune des technologies. Ces profils donnent une représentation graphique des performances obtenues par les technologies sur chacun des critères, en utilisant les valeurs calculées pour chacune des échelles normalisées. Grâce à cette représentation, l'utilisateur obtient une vision claire des points forts et points faibles des technologies évaluées, en faisant apparaître la position des performances par rapport aux niveaux « acceptable » et « satisfaisant ». La Figure 17 montre les profils de performance qui ont été obtenus à l'issue du processus de construction des fonctions de valeur mené auprès du constructeur automobile interrogé.

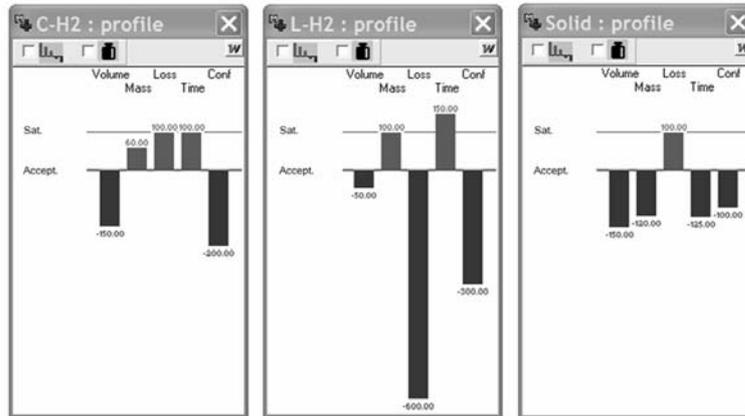


Figure 17 : Profils de performance obtenus à l'issue du processus de construction des fonctions de valeur auprès du constructeur automobile interrogé.

L'interprétation en détail de ces profils de performance est donnée dans la partie « Recommandations ». L'exercice se poursuit avec la détermination des constantes d'échelle w_i qui vont permettre de pondérer l'importance des critères les uns par rapport aux autres.

5.2.3 Détermination des constantes d'échelle

Dans la méthode MACBETH, la détermination des constantes d'échelle suit le même processus que pour la détermination des échelles d'attractivité. Cette phase s'appuie sur la définition de 5 « alternatives technologiques fictives » notées f_i et définies comme étant « satisfaisantes » pour le critère i et « acceptables » sur les autres critères. Ainsi par exemple, la technologie fictive f_{vol} est considérée « satisfaisante » sur le critère « volume du système » (80 litres) mais « acceptable » sur l'ensemble des autres critères. Le Tableau 6 synthétise les performances prises en compte pour chacune des 5 « alternatives fictives » correspondant aux niveaux « acceptable » et « satisfaisant » choisis par le constructeur automobile interrogé.

Tableau 6 : Performances des cinq « alternatives fictives » correspondant aux niveaux « satisfaisant » et « acceptable » choisis par le constructeur automobile interrogé.

Technologies	Volume du système (l)	Masse du système (kg)	Temps de remplissage (min)	Taux de pertes d'hydrogène (g/h/kgH ₂)	Conformabilité (qualitatif)
f_{volume}	80	200	8	0.04	Mauvaise
f_{masse}	150	100	8	0.04	Mauvaise
$f_{remplissage}$	150	200	4	0.04	Mauvaise
f_{pertes}	150	200	8	0	Mauvaise
$f_{conformabilité}$	150	200	8	0.04	Bonne

Le constructeur automobile a ensuite été interrogé sur l'ordre de préférence entre les alternatives fictives. En d'autres termes, en partant d'une technologie fictive qui aurait l'ensemble de ses performances au niveau « acceptable », cela revient à définir quelle amélioration (c'est-à-dire quel passage du niveau « acceptable » au niveau « satisfaisant ») apparaît comme la plus intéressante parmi les cinq possibilités. Par ce processus, l'ordre de préférence des alternatives fictives obtenu auprès du constructeur automobile fut le suivant :

$$f_{\text{volume}} > f_{\text{masse}} > f_{\text{conformabilité}} > f_{\text{remplissage}} > f_{\text{pertes}}$$

Ce rangement signifie que selon le constructeur automobile interrogé, la réduction du volume du système de 150 litres à 80 litres est pour lui l'amélioration prioritaire, toutes choses égales par ailleurs, par comparaison avec les autres améliorations matérialisées par les autres alternatives fictives.

A partir de cette information, le constructeur automobile a été interrogé sur ses jugements en terme de différence d'attractivité entre ces alternatives fictives. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer qualitativement l'intensité de la préférence entre par exemple l'amélioration du volume et l'amélioration de la masse, toutes choses égales par ailleurs. A nouveau, cette phase de l'évaluation est réalisée par l'intermédiaire d'une matrice des différences d'attractivité mais cette fois ce ne sont plus les technologies de stockage d'hydrogène qui sont comparées, mais les alternatives fictives. La Figure 18 illustre la matrice des différences d'attractivité entre les alternatives fictives, obtenue auprès du constructeur automobile interrogé. Le logiciel M-MACBETH s'appuie sur cette matrice pour ensuite calculer les valeurs des constantes d'échelles qui satisfont aux jugements exprimés par le constructeur automobile (Figure 19).

	[Volume]	[Mass]	[Conform]	[Refuel]	[Loss]	[toutes inf]	Current scale	
[Volume]	no	weak-mod	positive	positive	positive	positive	37.50	extreme
[Mass]		no	weak	positive	positive	positive	29.16	v. strong
[Conform]			no	moderate	positive	positive	20.83	strong
[Refuel]				no	very weak	positive	8.34	moderate
[Loss]					no	positive	4.17	weak
[toutes inf]						no	0.00	very weak
								no

Figure 18 : Matrice des différences d'attractivité entre alternatives fictives renseignée avec les jugements exprimés par le constructeur automobile interrogé.

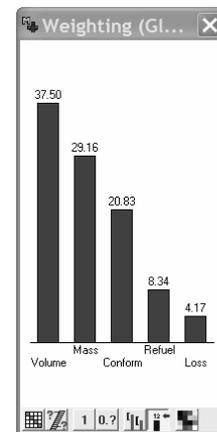


Figure 19 : Valeurs des constantes d'échelle attribuées par le logiciel M-MACBETH sur la base des jugements renseignés dans la matrice d'attractivité.

5.2.4 Echelle globale

A l'issue de ce processus, on dispose par conséquent de l'ensemble des valeurs des paramètres qui permettent le calcul de la valeur globale $v(a_j)$ attribuée à chaque alternative a_j . Connaissant les constantes d'échelle, on effectue une somme pondérée des fonctions de valeur. Le résultat obtenu suite à l'agrégation finale est donné dans le figure 14.

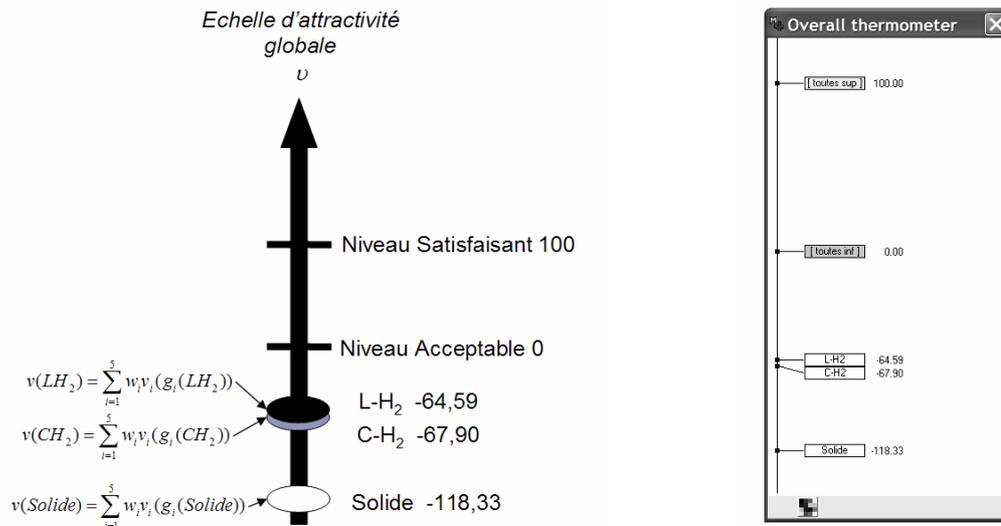


Figure 20 : Echelle globale d'attractivité obtenue à l'issue du processus d'évaluation multicritère mis en œuvre auprès du constructeur automobile interrogé et dans le cadre de l'application automobile « véhicule équipé d'une pile à combustible et d'une capacité de stockage de 6 kg d'hydrogène ».

L'interprétation de ce résultat est donnée par la suite dans la partie « Recommandations ».

5.3. Recommandations

Comme cela l'a été présenté au Chapitre 4, tout processus d'évaluation multicritère conduit à l'établissement de recommandations. Nous cherchons ici à interpréter la portée des résultats obtenus par la mise en œuvre de la méthode qui a été choisie. Nous interprétons dans un premier temps les profils de performance des technologies de stockage embarqué, puis dans un deuxième temps l'échelle globale agrégée obtenue.

5.3.1. Interprétation des profils de performance

Rappelons tout d'abord que l'étude a été réalisée pour une application automobile spécifique, un « véhicule équipé d'une pile à combustible et ayant une capacité de stockage de 6 kg d'hydrogène ». Il faut garder à l'esprit que l'évaluation a été menée dans le cadre de cette application et qu'il ne faut pas chercher à généraliser les résultats obtenus.

Les profils de performance obtenus montrent que chacune des technologies présente au moins deux performances situées sous le niveau acceptable :

- stockage sous pression : le volume et la conformabilité
- stockage liquide : le volume, les pertes d'hydrogène et la conformabilité
- stockage solide : le volume, la masse, la conformabilité, le temps de remplissage

On constate que le volume et la conformabilité sont, pour cette application, les points faibles « communs » entre les technologies de stockage embarqué d'hydrogène évaluées. Les paragraphes suivants présentent les axes d'amélioration qui ont été proposés par le constructeur automobile interrogé pour pallier aux points faibles identifiés.

Stockage sous pression :

Outre la problématique du volume, commune à toutes les technologies de stockage d'hydrogène, le constructeur automobile interrogé reproche à la technologie de stockage sous pression son manque de conformabilité, dans le cas d'application « véhicule équipé d'une PAC et ayant une capacité de stockage de 6 kg d'hydrogène ». Actuellement les réservoirs de stockage à 70 MPa sont conçus avec des géométries cylindriques. Le développement de systèmes de stockage sous pression conformables, c'est-à-dire pouvant prendre des formes variées et s'adapter à l'architecture existante des véhicules, est un axe de R&D qui devrait être développé, selon l'acteur interrogé. Quelques travaux de recherche vont dans ce sens à l'heure actuelle. Des réservoirs conformables ont été développés par la société THIOKOL [21] mais leur conformité aux réglementations n'a pas encore été démontrée. Une autre possibilité envisagée par certains fabricants est de diminuer le volume unitaire des réservoirs ce qui permettrait de mieux

occuper l'espace disponible dans l'architecture des véhicules. En revanche, pour un volume interne donné, la multiplication du nombre de réservoirs entraîne une augmentation de volume externe du système, de la masse et du coût. Ce type de système n'a pas encore été testé dans un véhicule prototype. Enfin de nouvelles architectures de véhicules élaborées en tenant compte de la contrainte géométrique du stockage de l'hydrogène devraient être développées. Certains constructeurs automobiles explorent cette voie d'amélioration en incorporant les réservoirs de stockage de manière longitudinale dans les châssis des véhicules [4].

Stockage liquide :

Outre la problématique du volume, commune à toutes les technologies de stockage d'hydrogène, la technologie liquide présente l'inconvénient des pertes d'hydrogène (de l'ordre de 3% de pertes par jour avec les systèmes actuels). Le constructeur automobile interrogé considère que cette performance n'est pas « acceptable » dans le cas de l'application finale étudiée ici. En d'autres termes, un important effort de R&D est nécessaire pour limiter ces pertes d'hydrogène et passer le seuil « acceptable » estimé à 0.04 g/h/kg_{H2} soit 0.1% de pertes par jour par le constructeur automobile interrogé. Des voies technologiques sont en cours de développement par le fabricant Linde pour diminuer les pertes d'hydrogène [24]. Cependant, l'impact, sur le volume et la masse totale du système, de l'ajout de dispositifs auxiliaires pour la gestion des évaporations doit être évalué. La gestion des évaporations est également envisagée grâce au concept de stockage « cryo-compressé ». Cette technologie, en cours de développement, a pour but d'augmenter la tenue mécanique des réservoirs cryogénique, de façon à ce que la pression interne qu'ils puissent supporter atteigne jusqu'à 30 MPa, tandis qu'à l'heure actuelle, les évaporations d'hydrogène sont évacuées dès lors que la pression interne atteint 1 MPa. Des travaux sur ce sujet sont en cours aux Etats-Unis [25]. Pour ce qui concerne la conformabilité, de la même façon que pour le stockage sous pression, l'intégration du système de stockage liquide à l'architecture du véhicule serait envisagée par BMW de manière longitudinale dans le châssis du véhicule, afin de limiter au maximum les pertes de volume dues à la géométrie du système de stockage [22]. A l'heure actuelle aucun réservoir d'hydrogène liquide adapté à ce concept n'a encore été intégré à un véhicule prototype.

Stockage solide :

Outre la problématique du volume, commune à toutes les technologies de stockage d'hydrogène, le constructeur automobile interrogé considère que la technologie « solide » n'est pas « acceptable » sur le plan de la masse des systèmes pour l'application étudiée. D'importants efforts de R&D devraient être engagés afin de réduire la masse des systèmes sous le seuil des 200 kg pour 6 kg d'hydrogène stockés, seuil « acceptable » exprimé par l'acteur PSA pour cette application. Le temps de remplissage apparaît également comme un axe de R&D prioritaire pour la technologie solide dont les performances actuelles se situent sous le seuil « acceptable » défini par l'acteur interrogé et placé à 8 minutes ; des efforts de R&D devraient donc être engagés afin d'atteindre un temps de remplissage inférieur à 8 minutes pour les 6 kg d'hydrogène à stocker dans le cas de l'application étudiée. L'atteinte de cet objectif passe par la conception et la réalisation de réservoirs et d'échangeurs de chaleur efficaces, associés à des matériaux performants en terme de cinétique.

5.3.2. Les limites de l'interprétation de l'échelle globale d'attractivité obtenue

L'échelle d'attractivité globale est une synthèse des performances des technologies sur chaque critère et des préférences exprimées par l'acteur interrogé sur l'importance relative des critères. Elle représente ainsi une vision du constructeur automobile interrogé sur l'état d'avancement technique des technologies de stockage embarqué. Cette échelle révèle que les trois technologies de stockage embarqué évaluées nécessitent des efforts de recherche majeurs pour pouvoir satisfaire aux objectifs de performance fixés par le constructeur automobile interrogé et dans le cadre de l'application automobile étudiée ici. L'échelle révèle par ailleurs que les technologies sous pression et liquide présente un état d'avancement technique tandis que la technologie solide présente un état d'avancement inférieur à celles-ci.

Néanmoins, l'interprétation de cette échelle reste limitée ; en effet l'information qu'elle donne est une information très agrégée et il n'est pas possible d'en extraire un détail précis des axes de R&D à traiter pour chacune des technologies. On constate par conséquent que compte tenu de l'objet de l'étude et des objectifs du projet STORHY, le travail d'interprétation le plus intéressant concerne les profils de performance.

6. Conclusions et perspectives

Afin de rendre plus objective la comparaison entre les performances des différentes voies technologiques envisagées pour le stockage embarqué de l'hydrogène, une activité d'évaluation multicritère a été proposée par le CEA au travers du projet Européen STORHY. Une méthode d'évaluation multicritère a été mise en œuvre pour comparer les systèmes de stockage embarqué sous pression, liquide et solide sur le plan technique et dans le cadre d'une application de type « véhicule équipé d'une pile à combustible et ayant une capacité de stockage de 6 kg d'hydrogène ». Cinq critères d'évaluation ont été pris en compte : le volume, la masse, le temps de remplissage, le taux de pertes d'hydrogène et la conformabilité. La méthode cardinale MACBETH a été choisie pour mener à bien cette évaluation.

Le processus d'évaluation a permis :

- de modéliser les performances des technologies,
- de modéliser les objectifs techniques du constructeur automobile interrogé,
- de modéliser l'écart entre les performances des technologies et les objectifs techniques,
- d'obtenir les profils de performance de chaque technologie, révélant les axes de R&D majeurs restant à développer,
- d'obtenir une échelle globale d'attractivité montrant l'état d'avancement technique global de chaque technologie de stockage d'hydrogène.

Parmi les cinq critères d'évaluation considérés, et selon le constructeur automobile interrogé, les axes de recherche identifiés pour chacune des technologies sont :

- pour le stockage sous pression à 70 MPa : la réduction du volume et l'amélioration de la conformabilité,
- pour le stockage liquide : la réduction du volume, l'amélioration de la conformabilité et la réduction des pertes d'hydrogène,
- pour le stockage solide : la réduction du volume, l'amélioration de la conformabilité, la réduction de la masse et la réduction du temps de remplissage.

Pour davantage de détails sur les résultats techniques obtenus au cours du projet Européen STORHY, on pourra se référer à [14]. En conclusion, utiliser une méthode multicritère pour l'évaluation et la comparaison de technologies en développement est une démarche intéressante pour compléter les travaux de R&D et positionner les technologies dans le contexte des applications finales pour lesquelles elles sont destinées.

7. Remerciements

Le CEA remercie la Commission Européenne pour son support dans le cadre du projet STORHY, ainsi que les chercheurs du Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision (LAMSAD), Unité Mixte de Recherche (UMR7024) Université Paris Dauphine – CNRS, pour leur fructueuse collaboration.

8. Références

- [1] International Panel on Climate Change, *Fourth Assessment Report : Climate Change 2007*, 2007
- [2] CEA, *Projet Européen STORHY, Hydrogen Storage Systems for Automotive Application*, 2008
- [3] Linde, Clefs CEA n°50/51, 2005
- [4] Eberle, U., *GM's research strategy. Towards a hydrogen-based transportation system*, FuncHy Workshop, Hamburg, September 2006
- [5] Abele, A.R., *Quantum hydrogen storage systems*, ARB ZEV technology Symposium, Sacramento, Septembre 2006
- [6] BMW, Illustration disponible à l'adresse <http://sine.ni.com/cms/images/casestudies/bmwcar.jpg>
- [7] Züttel, A., *Materials for hydrogen storage*, Materials Today, Septembre 2003
- [8] Mori, D., *High pressure metal hydride tank for fuel cell vehicles*, IPHE International Hydrogen Storage Technology Conference, Lucca (It), Juin 2005
- [9] Tzimas, E., *Hydrogen storage : state-of-the-art and future perspective*, Commission Européenne, Directorate General Joint Research Centre, 2003 énergie liquéfaction
- [10] Principi, G., *Materials for hydrogen storage in solid state: a survey*, World Hydrogen Technologies Convention, Montecatini (It), Novembre 2007
- [11] Young, R., *Advances of solid hydrogen storage systems*, NHA Conference, 2003

- [12] Sandrock, G., *A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view*, Journal of Alloys and Compounds, 1999 293-295 877-888
- [13] Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M., *Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review*, Int. Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007) 1121-1140
- [14] STORHY Project, *Hydrogen Storage Systems for Automotive Application*, Final Event, www.storhy.net
- [15] Bouyssou, D., Perny, P., *Aide multicritère à la décision et théorie du choix social*, Nouvelles de la science et des technologies, 15, 1997
- [16] Roy, B., *Paradigms and Challenges*, in Multiple criteria decision analysis, State of the art surveys, pp 2-23, Springer's International Series, 2005
- [17] Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., *Multiple criteria decision analysis, State of the art surveys*, Springer's International Series, 2005
- [18] Guitouni, A., Martel, J.M., *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*, European J. of Operational Research 109, 501-521, 1998
- [19] Roy, B., Bouyssou, D., *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Economica, Paris, 1993
- [20] Bana e Costa, C., De Corte, J. M., Vansnick, J. C., *MACBETH*, LSE OR Working Paper, London School of Economics, 2003
- [21] Haaland, A., *High-Pressure Conformable Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles*, Thiokol Propulsion, Hydrogen Program Review, 2000
- [22] Brunner, T., *BMW CleanEnergy - Fuel Systems, Liquid Hydrogen Vehicle Storage*, ZEV Technology Symposium, Septembre 2006
- [23] Anton, D.L., *High density hydrogen storage system demonstration using NaAlH₄ complex compound hydrides*, UTRC, DoE Merit Review, Arlington, Mai 2005
- [24] Reijerkerk, J., *Potential of cryogenic hydrogen storage in vehicles*, NHA Conference, Los Angeles, 2004
- [25] Aceves, S., *Cryogenic capable pressure vessels for vehicular hydrogen storage*, LLNL, DoE Review, May 2007