

**Titre de la thèse :** Estimation en ligne de l'état de charge d'un système de stockage solide de l'hydrogène

**Thesis title:** On-line state-of-charge estimation of a solid-state hydrogen storage system

**Laboratoire d'accueil / Host Laboratory:** FEMTO-ST Research Institute - UMR CNRS

**Spécialité du doctorat préparé/Speciality :** Automatique / Automatic

**Mots-clefs :** état de charge, hydrogène, hydrures métalliques, gestion d'énergie, HIL

**Keywords:** state of charge, hydrogen, metal hydrides, energy management, HIL

**Descriptif détaillé de la thèse**

Le développement d'une mobilité durable est l'un des principaux objectifs de la transition énergétique. Les solutions basées sur l'hydrogène viennent en complément de celles qui reposent sur une électrification entièrement basée sur les batteries. Cependant, l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle se heurte à plusieurs obstacles technologiques [1]. L'hydrogène est très léger, occupant à masse égale un volume plus grand que tout autre gaz. Ce trait représente un défi pour son stockage et son transport. À température et pression normales, environ 11m<sup>3</sup> de volume, soit l'équivalent du volume du coffre d'un grand véhicule utilitaire, sont nécessaires pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène. Cette quantité est suffisante pour parcourir 100 km. Pour le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène, la solution consiste soit à le liquéfier par refroidissement (-253°C), soit à le maintenir gazeux sous très haute pression (350 ou 700 bars, soit 350 ou 700 fois la pression atmosphérique) [2]. De plus, la molécule d'hydrogène est si petite qu'elle traverse la plupart des matériaux utilisés pour les réservoirs. Par conséquent, l'infrastructure d'acheminement de l'hydrogène est nettement plus problématique et coûteuse que celle des autres gaz courants. Une solution alternative consiste à stocker l'hydrogène dans des alliages métalliques à basse pression et température [3].

Certains métaux ou alliages de métaux réagissent spontanément avec le dihydrogène. Cette réaction produit un hydrure métallique et de la chaleur (réaction exothermique) pendant la phase de remplissage du réservoir (ou absorption) [4]. La réaction inverse, dite endothermique, permet de fournir du dihydrogène et du froid (désorption). Le caractère exothermique (respectivement, endothermique) des réactions d'absorption (respectivement, désorption) du dihydrogène confère une importance particulière à la gestion optimale des transferts thermiques au sein du lit d'hydrures. Ceux-ci sont intimement liés à la quantité d'hydrogène mise en jeu à chaque instant au sein d'un réservoir de ce type [5].

L'objectif de cette thèse est le développement d'un estimateur de l'état de charge pour les réservoirs d'hydrogène à hydrure métallique. Il est notable que très peu d'études aient exploré la possibilité d'une estimation précise et en temps réel de l'état de charge de ces réservoirs. Certaines méthodes qualifiées de simples sont fondées sur une relation directe entre l'état de charge du réservoir et le débit d'hydrogène qui y est, soit injecté, soit extrait [1], [5]–[8]. Cette relation est généralement exprimée par une table de correspondance ou par un modèle statique de régression. L'implémentation de ces méthodes est simple et elles peuvent fournir une estimation assez précise de l'état de charge lorsqu'un réservoir est utilisé isolément dans un banc d'essai. Néanmoins, une complexité se présente lorsque ces réservoirs sont couplés à une pile à combustible pour former un système de cogénération. L'état de charge du système devient alors dépendant de la dynamique de la pile à combustible.

Le (la) candidat (e) retenu (e) pour mener ces travaux de cette thèse devra explorer de nouvelles approches d'estimateurs dans le but d'une mise en œuvre pratique à travers les actions suivantes :

- Développement d'algorithmes en temps réel pour estimer l'état de charge des réservoirs hydrures, applicables à la fois pour le transport et les applications stationnaires.
- Mise en place d'un système PHIL pour tester, valider et vérifier les performances des algorithmes développés.
- Intégration de ces algorithmes dans la gestion de l'énergie de systèmes hybrides alimentés par des piles à combustible et des réservoirs d'hydrures métalliques.

**Description of the thesis:**

The development of sustainable mobility is one of the main objectives of the energy transition. Hydrogen-based solutions complement those based entirely on battery-powered electrification. However, there are several technological obstacles to the large-scale use of hydrogen [1]. Hydrogen is very light, occupying a greater volume than any other gas for the same mass. This makes it a challenge to store and transport. At normal temperature and pressure, around 11 m<sup>3</sup> of volume - equivalent to the boot space of a large commercial vehicle - is needed to store just 1 kg of hydrogen. This is enough to cover 100 km. To store, transport and distribute hydrogen, the solution is either to liquefy it by cooling (-253°C), or to keep it gaseous under very high pressure (350 or 700 bars, i.e., 350- or 700-times atmospheric pressure) [2]. What's more, the hydrogen molecule is so small that it passes through most of the materials used for tanks. As a result, the infrastructure needed to transport hydrogen is far more problematic and costly than for other common gases. An alternative solution is to store hydrogen in metal alloys at low pressure and temperature [3].

Some metals or metal alloys react spontaneously with dihydrogen. This reaction produces a metal hydride and heat (exothermic reaction) during the tank filling (or absorption) phase [4]. The reverse reaction, known as endothermic, produces dihydrogen and cold (desorption). The exothermic (respectively, endothermic) nature of dihydrogen absorption (respectively, desorption) reactions lend particular importance to the optimum management of heat transfer within the hydride bed. These are intimately linked to the quantity of hydrogen in play at any given moment in a reservoir of this type [5].

The objective of this thesis is the development of a state-of-charge estimator for metal hydride hydrogen tanks. It is noteworthy that very few studies have explored the possibility of accurate, real-time state-of-charge estimation for these tanks. Some methods, described as simply, are based on a direct relationship between the state of charge of the tank and the flow rate of hydrogen either injected into or extracted from it [1], [5]-[8]. This relationship is usually expressed by a mapping table or a static regression model. The implementation of these methods is straightforward, and they can provide a fairly accurate estimate of the state of charge when a tank is used in isolation in a test rig. However, a complexity arises when these tanks are coupled with a fuel cell to form a cogeneration system. The system's state of charge then becomes dependent on the dynamics of the fuel cell.

The candidate selected to carry out this thesis project will have to explore new approaches of estimators with the aim of practical implementation through the following actions:

- Development of real-time algorithms for estimating the state of charge of hydride tanks, applicable to both transport and stationary applications.
- Implementation of a PHIL system to test, validate and verify the performance of the proposed algorithms.

- Integration of these algorithms into energy management of hybrid fuel cell power sources supplied by metal hydride tanks.

#### Références bibliographiques / Bibliography

- [1] D. Chabane, F. Harel, A. Djerdir, D. Candusso, O. Elkedim, and N. Fenineche, "A new method for the characterization of hydrides hydrogen tanks dedicated to automotive applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 27, pp. 11682–11691, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.048.
- [2] S. H. Suárez, D. Chabane, A. N'Diaye, Y. Ait-Amirat, and A. Djerdir, "Static and dynamic characterization of metal hydride tanks for energy management applications," *Renew. Energy*, vol. 191, pp. 59–70, May 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.04.029.
- [3] D. Chabane, M. Ibrahim, F. Harel, A. Djerdir, D. Candusso, and O. Elkedim, "Energy management of a thermally coupled fuel cell system and metal hydride tank," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 50, pp. 27553–27563, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.247.
- [4] D. Chabane, F. Harel, A. Djerdir, D. Candusso, O. Elkedim, and N. Fenineche, "Dynamic modeling of hydrogen desorption from a metal hydride tank using the electrical fluidic analogy," p. 1 p, Jun. 2016, Accessed: Aug. 04, 2018. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01366243>
- [5] S. H. Suárez, D. Chabane, A. N'diaye, Y. Ait-Amirat, O. Elkedim, and A. Djerdir, "Evaluation of the Performance Degradation of a Metal Hydride Tank in a Real Fuel Cell Electric Vehicle," *Energies 2022, Vol. 15, Page 3484*, vol. 15, no. 10, p. 3484, May 2022, doi: 10.3390/EN15103484.
- [6] D. Zhu, D. Chabane, Y. Ait-Amirat, A. N'Diaye, and A. Djerdir, "Estimation of the State of Charge of a Hydride Hydrogen Tank for Vehicle Applications," in *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2017.8330976.
- [7] D. Chabane, L. Serairi, M. Iqbal, A. Djerdir, N. Fenineche, and O. Elkedim, "Innovative method to estimate state of charge of the hydride hydrogen tank: application of fuel cell electric vehicles," *Int. J. Model. Simul.*, 2021, doi: 10.1080/02286203.2021.1891495.
- [8] D. Chabane, F. Harel, A. Djerdir, D. Candusso, O. El Kedim, and N. Fenineche, "Dynamic modeling of hydrogen desorption from a metal hydride tank using the electrical fluidic analogy," *World Hydrog. Energy Conf.*, vol. 1, 2016, Accessed: Jan. 04, 2017. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01366243>

#### Profil demandé

Il est requis d'avoir une forte motivation pour la recherche scientifique et de posséder des compétences avancées en langue anglaise. Le candidat doit également faire preuve de rigueur, de méthode, d'autonomie et de compétences pratiques en simulation, analyse et présentation des données. Un Master 2 ou équivalent en automatique et/ou génie électrique.

#### Candidate profile

A strong motivation for scientific research and advanced English language skills are required. The candidate must also demonstrate rigor, method, autonomy and practical skills in simulation, data analysis and presentation. A master's degree or equivalent in control theory and/or electrical engineering.

#### Financement :

**Début du contrat** : 1<sup>er</sup> Octobre 2023 / **Start of the Contract** : October, 1st, 2023

**Salaire mensuel brut** : 1975€ / **Gross monthly Salary** : 1975€

#### Encadrement de la thèse :

Prof. Abdesslem DJERDIR, UTBM, FEMTO-ST  
 Prof. Salah LAGHROUCHE, UTBM, FEMTO-ST  
 Ass. Prof. Djafar CHABANE, UTBM, FEMTO-ST

**Documents à fournir par le candidat :**

- CV
- Lettre de motivation
- Relevés de notes avec classements en M1 et M2
- Lettre(s) de recommandation

**List of documents to be provided:**

- CV
- Cover Letter
- Academic transcript and ranking of Master 1 and 2
- Letter(s) of recommendation

**Contacts**

Les candidats sont invités à envoyer leur dossier de candidature par mail à l'adresse suivante:/Candidates are invited to send their applications by e-mail to the following address:  
[djafar.chabane@utbm.fr](mailto:djafar.chabane@utbm.fr)

La date de clôture des candidatures est le 15 septembre 2023 / Closing date for the application is September 15th, 2023.