



Etude expérimentale du comportement d'un réacteur métal-hydrogène lors de la désorption soumis à un champ d'induction électromagnétique

Sihem Belkhiria, Chaker Briki, Mouhamed Housine Dhaou, Nasr Sdiri, Abdelmajid Jemni, Faouzi Askri, Sassi Ben Nasrallah,

*Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques, ENIM, Université de Monastir
Sihem_belkhiria@yahoo.fr, chaker_briki@yahoo.fr, dhaou_2000tm@yahoo.fr, sdirinasr@yahoo.fr,*

abdelmajid.jemni@enim.rnu.tn, faouzi.askri@enim.rnu.tn, sassi.bennasrallah@enim.rnu.tn

Résumé

L'épuisement des sources fossiles et la demande croissante d'énergie ont poussé les chercheurs à développer de nouvelles techniques de stockage d'énergie. Parmi lesquelles, le stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques dans des Réacteurs Métal-Hydrogène (RMH) est recommandé. Bien que l'hydrogène puisse être stocké sous forme de gaz comprimé, de liquide cryogénique, le stockage sous forme d'hydrure métallique est considéré comme étant plus prometteur parce qu'il offre une grande capacité de stockage de l'hydrogène dans des conditions de pression et de température proches de l'ambiance (plus de sécurité). Le processus absorption/désorption de l'hydrogène par un métal (hydrure) est assez complexe. En effet, des transferts simultanés de chaleur et de masse ont lieu lors de la sorption de l'hydrogène par l'hydrure. Le processus de désorption nécessite l'apport de la chaleur au RMH (réaction endothermique). Cet apport est souvent fourni via des échangeurs de chaleur. Vu la faible conductivité thermique effective des hydrures métalliques, la propagation de la chaleur dans le milieu est difficile et le chauffage ne se fait pas d'une façon uniforme. Afin d'assurer un chauffage uniforme du milieu, on se propose d'utiliser l'induction électromagnétique. Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement le comportement d'un RMH lors de la désorption de l'hydrogène par le métal. L'effet de la tension appliquée sur la bobine est étudié. Une comparaison des résultats obtenus par induction électromagnétique et par échangeur de chaleur montre une amélioration de l'efficacité du réacteur.

Mots clés :

Hydrure métallique, Désorption d'hydrogène, transfert de chaleur, induction électromagnétique

1. Introduction

L'épuisement des combustibles fossiles et l'augmentation de la demande d'énergie ont incité la communauté internationale à exploiter les énergies renouvelables. En raison de leurs caractères intermittents, ces énergies nécessitent un système de stockage. Le développement de nouvelles technologies de stockage d'énergie continue d'intéresser les chercheurs. L'hydrogène, en tant que vecteur d'énergie, pourrait émerger comme une solution efficace sérieuse pour utiliser l'énergie renouvelable et pour sauver le système énergétique mondial. Bien que l'hydrogène puisse être stocké sous forme de gaz comprimé et de stockage de liquide cryogénique, l'hydrure métallique est considéré comme plus prometteur car il offre une grande capacité de stockage de l'hydrogène à la pression atmosphérique et à la température; par conséquent, il est plus sûr que les systèmes de stockage gazeux et cryogéniques [3,4]. La forme de stockage solide est un moyen très attrayant car il est plus sûr et plus facile à manipuler que le stockage gazeux et cryogénique. Mais son développement est limité par un problème de transfert de chaleur dans le lit d'hydrure. En effet, la réaction d'absorption est fortement exothermique et la désorption est endothermique [5]. En conséquence, nous avons toujours besoin d'une température d'alimentation externe de refroidissement (chauffage), dans le cas de l'absorption (désorption). Les hydrures métalliques sont généralement classés en fonction de leur température de fonctionnement: température basse (20 ° C à 100 ° C) ou température élevée (200 ° K - 400 ° K) [6]. Mahran Valizadeh et al. [7] montrent que l'augmentation de la température du fluide améliore la cinétique de désorption de l'hydrure intermétallique LaNi₅. Ha et al. [8] montrent que l'absorption d'hydrogène par l'intermétallique LaNi₅ est régie par le transfert de chaleur du lit d'hydrure au fluide de refroidissement entourant le système de stockage. Le taux de désorption, ainsi que le taux d'absorption, dépendent fortement des quantités de chaleur éliminées ou fournies au système

métal-hydrogène. Beaucoup de recherches montrent que le transfert de chaleur est un phénomène très important et doit être pris en compte pour améliorer les performances de stockage de l'hydrogène sous forme solide et donc pour développer un réservoir d'hydrogène efficace. Pour améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur du lit d'hydrure et par conséquent les performances du stockage d'hydrogène, il est nécessaire d'optimiser la conception du système de stockage en l'équipant par des échangeurs de chaleur efficaces. En général, les réacteurs métal-hydrogène peuvent être classés en 3 catégories: tubulaire, disque et réservoir ou réacteur à chambre [9]. Parmi les réacteurs conventionnels, ceux qui sont équipés d'un échangeur de chaleur spirale présentent une meilleure performance par rapport à d'autres configurations [9]. Une étude expérimentale et numérique a été réalisée par Demircan et al. [10] pour deux configurations système de stockage contenant l'alliage LaNi₅. Le premier est un réacteur cylindrique refroidi sur sa surface latérale et sa base. Le second est formé par deux tubes concentriques et la poudre est introduite dans l'espace entre les deux tubes. Dans ce cas, en plus du refroidissement sur la surface latérale, il y a un échange de chaleur dans la cavité du tube interne. Ataer et al [11] ont montré que la configuration du réacteur de deux tubes concentriques présente un meilleur taux d'absorption d'hydrogène que celle du cylindre. S. Mellouli et al. [12] ont étudié l'effet de l'utilisation d'un échangeur de chaleur en spirale pour améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur du lit d'hydrure. Les résultats expérimentaux montrent que les temps de charge / décharge du réacteur sont considérablement réduits. Ensuite, un modèle mathématique a été développé par le même groupe de recherche [13] pour évaluer les différents modèles de réservoir de stockage de métal-hydrogène. Les résultats sont comparés avec des données expérimentales. Mitsutake et al [14] ont étudié expérimentalement et numériquement la possibilité d'équiper un système de stockage de spires longitudinales et radiales. Ces échangeurs permettent un transfert de chaleur plus rapide et plus puissant entre le lit d'hydrure et le fluide de chauffage. Malgré que toutes ces méthodes améliorent considérablement le transfert de chaleur, mais elle restent souffrir, pour une faible conductivité thermique effective des hydrures intermétalliques, de la difficulté de la propagation de la chaleur entre le fluide chaud et le lit d'hydrure. Le chauffage n'est pas donc uniforme dans le lit d'hydrure, en particulier lorsque le réacteur a une masse importante. En conséquence, le temps de réaction est encore long et il ya une perte de chaleur le long de l'installation. D'autre part, la désorption sous une température élevée (> 100 ° C) nécessite une quantité importante d'énergie. En outre, l'intégration de l'échangeur dans le réacteur affecte sa capacité en termes de capacité de stockage. En effet, le volume occupé par l'échangeur sera au détriment de sa capacité de la poudre d'hydrure.

L'idée de ce papier est d'utiliser un autre système de chauffage: le chauffage par induction électromagnétique (IEM). Le chauffage par IEM a une particularité de générer de la chaleur directement dans les matériaux. Cette caractéristique présente de nombreux avantages par rapport aux procédés de chauffage traditionnels, tels que la réduction du temps de chauffage ou la capacité de chauffer le milieu uniformément. Le chauffage par IEM a été adopté dans diverses applications. L'exemple le plus concret est basé sur le fonctionnement d'une plaque d'induction. Il est également utilisé pour les techniques de trempe, de soudage, de fonderie et de scellage des conteneurs. Pour les procédés de fabrication modernes, le chauffage EMI offre une combinaison attrayante en termes de vitesse, de consistance, de contrôle et d'efficacité énergétique. Il respecte l'environnement et économique en termes d'énergie.

2. Dispositif et procédure expérimentale

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Il est constitué essentiellement par un petit réacteur en cuivre (diamètre intérieur: 30 mm, diamètre extérieur 38 mm, hauteur intérieure 15 mm, hauteur extérieure 20 mm masse 0,8 kg) contenant 30 g D'une poudre LaNi₅ activée par des cycles successifs d'absorption-désorption. La granulométrie est d'environ 15 µm et la porosité est d'environ 0,5. Le réacteur est entouré d'une petite bobine de 128 spires (rayon a = 40 mm et longueur h = 24 mm). La résistivité de la bobine est d'environ 0,8 Ω. La bobine est traversée par un courant alternatif délivré par un générateur de fréquence de 50 Hz à tension réglable. Le réacteur est également équipé d'un échangeur de chaleur externe appliqué sur la surface latérale. Un bain thermostatique (9,2 A, 2024 W) est utilisé pour alimenter l'échangeur de chaleur avec de l'eau dont la plage de températures est comprise entre 0 ° C et 100 ° C. Le réacteur est relié à un réservoir d'hydrogène (134,6 cm³) par des tubes de raccordement (29,13 cm³).

Deux thermocouples positionnés à l'intérieur et à l'extérieur du réacteur sont utilisés. La pression dans le lit d'hydrure est mesurée en installant un capteur entre le réservoir d'hydrogène et le lit d'hydrure. Tous ces capteurs sont connectés à une carte d'acquisition installée sur un ordinateur. Elle permet de mesurer les évolutions temporelles de température et de pression.

L'expérience commence par l'absorption. On charge le réservoir d'hydrogène à la pression désiré et on le met en contact avec le réacteur. La pression d'hydrogène diminue jusqu'à atteindre une valeur stable. Puisque la réaction d'absorption est exothermique, on refroidit le lit d'hydrure par le l'eau froide provenant du bain thermostaté. La désorption est la réaction inverse. L'hydrogène passe du réacteur vers le réservoir. Elle est endothermique, on chauffe, donc, le lit d'hydrure pour la déclencher. Le dispositif expérimentale utilisé équipé de deux systèmes de chauffage se: chauffage par fluide chaud provenant du bain thermostaté et chauffage par IEM avec une tension de 5 V et 7 V.

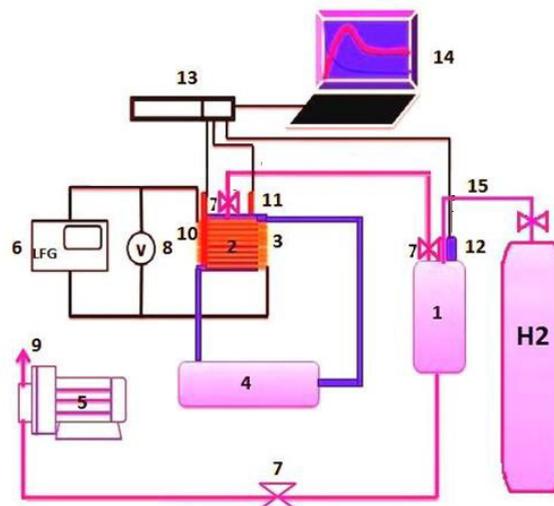


Figure 1 : Dispositif expérimentale

3. Résultats et discussion

Notre étude se focalise à l'étude de l'effet de l'IEM sur le vitesse de chauffage, le temps de réaction et l'énergie dissipée.

Figure 2 montre la variation des températures à l'intérieur de la paroi du réacteur. On observe que, pour les deux modes de chauffage, la paroi de cuivre se réchauffe plus vite que l'échantillon. Ceci est dû à la différence de chaleur massique entre le réacteur et l'échantillon.

Le chauffage par induction se produit plus rapidement que le chauffage par le fluide provenant du bain thermostatique. La vitesse de chauffage, lors de l'utilisation de l'IEM, augmente avec l'augmentation de la tension. Il est à noter que la température à l'intérieur du réacteur et la température sur la paroi deviennent égales, dans le cas du chauffage par induction, après un court laps de temps. Dans le cas du chauffage par fluide chaud, les courbes de température ne se croisent pas. Cette intersection des températures, lorsque le chauffage est par IEM, est due à l'importance de l'accumulation de chaleur dans le lit d'hydrure.

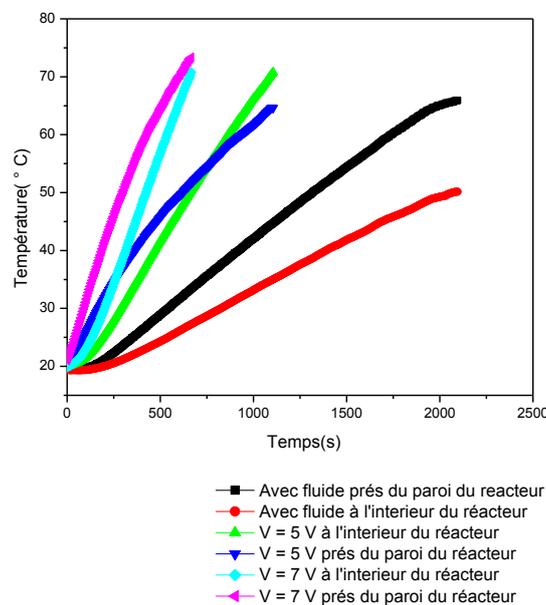


Figure 2 : Température à l'intérieur et près de la paroi du lit d'hydrure

Pour démontrer l'effet de l'IEM sur le temps du chauffage et sur le temps de réaction de désorption on a tracé la masse désorbé en fonction du temps pour différentes températures (50 ° C, 60 ° C et 70 ° C) lorsque le chauffage se fait par fluide chaud et lorsque le chauffage se fait par IEM à 5 V et 7 V (Figure 3, Figure 4 et Figure 5). La désorption est assurée par la mise en contact du lit d'hydrure saturé à un réservoir dont la pression initiale est

fixée. Cette mise en contact est effectuée lorsque la température dans le milieu d'hydrure atteint celle fixée. On remarque d'après ces figures que le temps de réaction de désorption se réduit considérablement, pour les trois températures, lorsque le chauffage se fait par IEM. Cette réduction du temps de réaction est plus importante lorsque la tension appliquée est de 7 V.

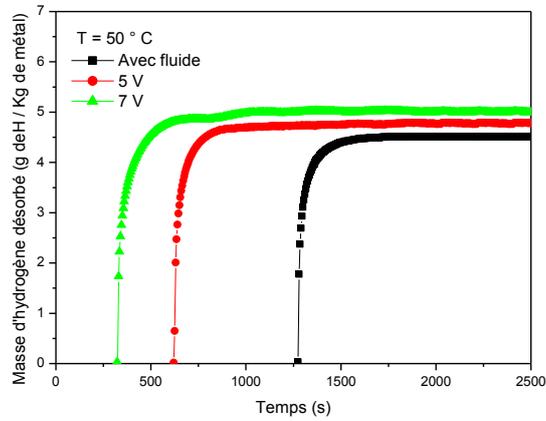


Figure 3 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 50 ° C

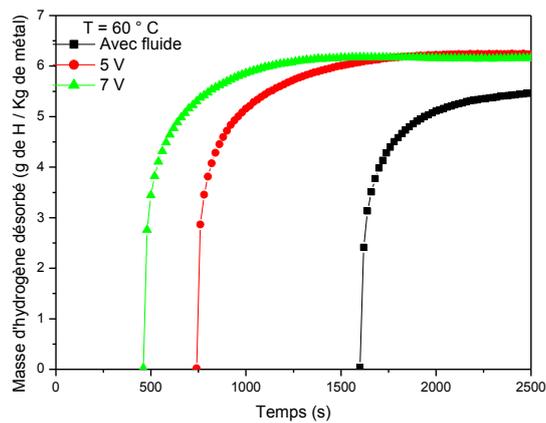


Figure 3 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 60 ° C

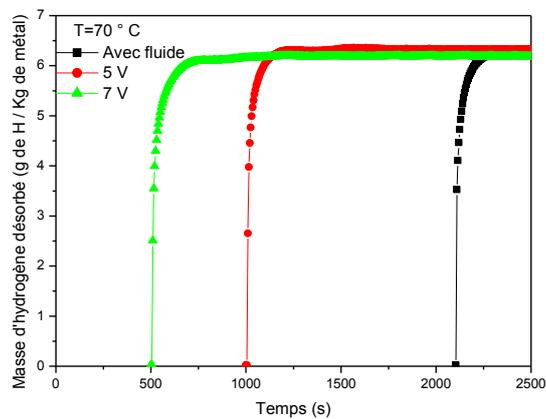


Figure 4 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 70 ° C

La figure 5 et la figure 6 montrent que l'énergie dissipée pour désorber 80 % de la masse de l'hydrogène stocké lorsque le chauffage se fait par circulation du fluide chaud, est largement plus élevée que celle dissipé dans le cas du chauffage par IEM. Ceci est due à la longue durée mise pour chauffer l'échantillon à la température souhaité.

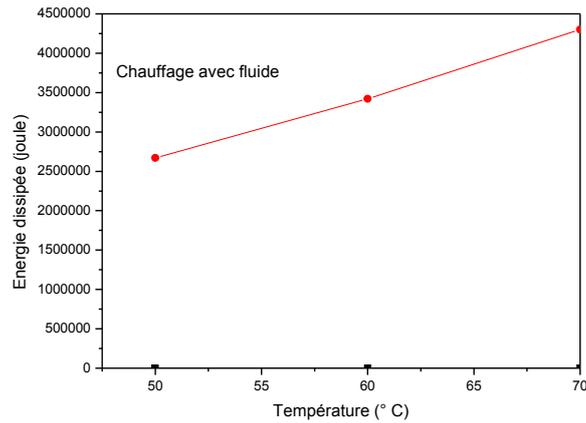


Figure 5 : Energie dissipée pour désorber 80 % de la masse lorsque le chauffage se fait par circulation du fluide chaud

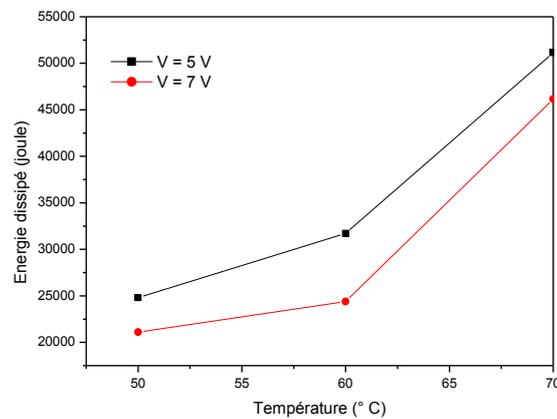


Figure 6 : Energie dissipée pour désorber 80 % de la masse lorsque le chauffage se fait par IEM à 5 V et 7 V

Conclusion

Dans ce travail nous avons expérimentale relative à l'amélioration des performances de réaction métal-hydrogène lors de la désorption. Deux types de chauffage du réacteur ont été considérer à savoir : chauffage par circulation d'eau chaude et chauffage par IEM. Les résultats montrent que l'utilisation de l'IEM améliore largement les performances du réacteur métal-hydrogène lors de la désorption en terme du temps de désorption et en terme d'énergie consommé

Références

- [1] I.P. Jain, Hydrogen the fuel for 21st century, International Journal of Hydrogen energy, volume 34, page 7368-7378, 2009.
- [2] M. Anik, F. Karanfil, N. KuÇökdveci, Development of the high performance magnesium based hydrogen storage alloy, International Journal of Hydrogen energy, volume 37, page 299-308, 2012.
- [3] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, International Journal of Hydrogen energy, volume 41, page 14535-14552, 2016.
- [4] S. Mellouli, E. Abhilash, F. Askri, S. Ben Nasrallah, Integration of thermal energy storage unit in a metal hydride hydrogen storage tank, Applied Thermal Engineering, volume 102, page 1185-1196, 2016.

- [5] A. Jemni, S. Ben Nasrallah, J. Lamloumi, Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 24, page 631-642, 1999.
- [6] S. Mellouli, E. Abhilash, F. Askri, S. Ben Nasrallah, Integration of thermal energy storage unit in a metal hydride hydrogen storage tank, *Journal of Applied Thermal Engineering*, volume 102, page 1185-1196, 2016.
- [7] M. Valizadeh, M. Aghajani Delavar, M. Farhadi, Numerical simulation of heat and mass transfer during hydrogen desorption in metal hydride storage tank by Lattice Boltzmann method, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 41, page 413-424, 2016.
- [8] M. Yeong Ha, I. Kyu Kim, H. Song, S. Sung, D. HyukLee, A numerical study of thermo-fluid phenomena in metal hydride beds in the hydriding process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 47, page 2901-2912, 2004.
- [9] S. Shafiee, M.H. McCay, Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride hydrogen storage systems- a review, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 41, page 9462-9470, 2016.
- [10] A. Demircana, M. Demiralp, Y. Kaplan, M.D. Mat, T.N. Veziroglu, Experimental and theoretical analysis of hydrogen absorption in LaNi₅-H₂ reactors, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 30, page 1437-1446, 2005.
- [11] M. Bilgili, Ö. Ataer, Numerical analysis of hydrogen absorption in a P/M metal bed, *Powder Technology*, volume 160, page 141-148, 2005.
- [12] S. Mellouli, F. Askria, H. Dhaoua, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, A novel design of a heat exchanger for a metal-hydrogen reactor, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 32, page 3501-3507, 2007.
- [13] S. Mellouli, F. Askri, H. Dhaou, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, Numerical study of heat exchanger effects on charge/discharge times of metal-hydrogen storage vessel, *International Journal of Hydrogen energy*, volume 34, page 3005-3017, 2009.
- [14] Y. Mitsutake, M. Monde, K. Shigetaka, S. Tsunokake, T. Fuura, Enhancement of heat transfer in hydrogen storage tank with hydrogen absorbing alloy (optimum fin layout), *Heat Transfer-Asian Research*, volume 37, page 165-183, 2008.

