

# Étude d'une technique de réduction du coût pour système de stockage hydrogène par une méthode de cogénération appliquée aux résidences

Moulebe Laince Pierre<sup>1, a)</sup> Touati Abdelwahed<sup>2</sup>, Nabila Rabbah<sup>3, b)</sup>

*Laboratoire d'Ingénierie de Structure, Système Intelligent et Energie Electrique ENSAM Casablanca, Université Hassan II*

a) [mpierrelaince12@gmail.com](mailto:mpierrelaince12@gmail.com), b) [touati\\_2010@hotmail.com](mailto:touati_2010@hotmail.com)

c) [nabila\\_rabbahyahoo.fr](mailto:nabila_rabbahyahoo.fr)

a) [mpierrelaince12@gmail.com](mailto:mpierrelaince12@gmail.com)

**Résumé :** La valorisation des énergies renouvelables (EnRs) dans le monde ne cesse d'augmenter, A ce titre, le tertiaire et les industriels sont constamment encourager à y faire recours. Toutefois, le problème d'injection de production cause problème du fait de l'instabilité des EnRs qui engendrent des pénalités. L'une des solutions à ce jour est l'usage des systèmes de stockages mais sachant que la lutte contre le CO2 est l'une des priorités à notre ère, il convient de faire recours à un système de stockage propre qui est l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau dite Proton Exchange Membrane (PEM). Dans cet article on décrit la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque avec production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (PEM), destinée à alimenter des charges électriques et thermiques d'un bâtiment, où l'énergie thermique est fournie par un collecteur thermique solaire. L'hydrogène stocker sert pour alimenter les batteries combustibles afin de maintenir les conditions d'injection du surplus de production dans le réseau ou pour une autoconsommation. Sachant que les dépenses d'énergie en matière de chauffage sont importantes, dans cette étude nous tenons compte d'une amélioration d'efficacité énergétique par cogénération sur l'alimentation thermique à travers un préchauffage utilisant la chaleur de l'électrolyse de l'eau. Les travaux sont effectués principalement sur Matlab Simulink.

Mot clés : Système solaire ; Stockage énergie ; hydrogène ; Proton exchange membrane ; puissance thermique ; cogénération ; injection d'énergie-bâtiment

## I. PROBLEMATIQUE

Le réchauffement climatique n'est plus un phénomène ignoré, en effet, la lutte contre l'émission du CO2 est le défi de toute la planète aujourd'hui et cela se fait principalement à travers l'usage des énergies renouvelables (EnRs), principalement à travers les Panneaux solaires et les éoliennes. Dans cette optique, on parle aussi de la valorisation économique de ces énergies par l'émergence de l'autoconsommation qui marque un tournant dans la transition énergétique. Elle répond à une demande profonde des clients. Entre la hausse de la facture énergétique et la baisse des coûts liés au photovoltaïque, l'autoconsommation devient une solution de plus en plus pertinente, avec un kWh solaire de plus en plus compétitif[1]. Cela offre aujourd'hui aux tertiaires et industriels la possibilité de vendre le surplus de leur production comme stipuler dans [2] . Néanmoins, l'imprévisibilité des énergies renouvelables, jointe aux écarts

de pénalité[1] utilisés sur le marché de la réglementation, rend difficile pour l'énergie propre de jouer un rôle important dans le système et laisse ces derniers retissant[3]. L'une des solutions utilisées pour palier à ce problème est l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie (ESS). Le stockage permet donc de maintenir le niveau d'injection lors de la variation des EnRs. Toutefois, l'utilisation des systèmes de stockage à base de batterie implique l'émission du CO<sub>2</sub>, Dans l'objectif d'avoir un système de stockage propre le recours à l'hydrogène par électrolyse de l'eau est l'une des solutions prometteuses[4].

À ce titre plusieurs travaux ont été effectués montrant leur usage dans le bâtiment [5] puis dans l'objectif d'approfondir des études sur leur valorisation et sur le rôle incontournable que représente le stockage d'énergie par hydrogène on retrouve plusieurs travaux dans la littérature [6]–[9]. Toutefois, le coût lié à cette technologie reste le principal problème à ce jour. En effet d'après des recherches du fait qu'il utilise des métaux nobles, son coût reste 2 à 3 fois plus élevé que l'électrolyse alcalin qui est quant à elle polluante.

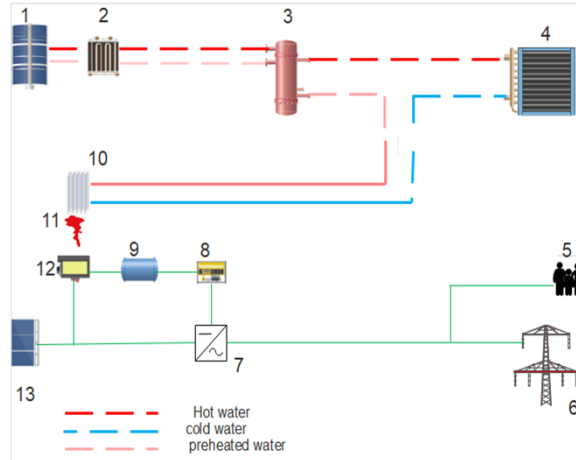


Fig1 : schéma de récupération de chaleur dans l'électrolyse

1: Capteur solaire / 2: échangeur / 3: ballon d'eau chaude / 4: chauffage (sol) / 5: autoconsommation électrique / 6: Réseau électrique / 7: convertisseur (onduleur) / 8: batterie combustible / 9: Accumulateur d'hydrogène / 10: Récupération de chaleur de l'électrolyseur / 11: électrolyseur / 12: électrolyseur de l'eau PEM / 13: panneau solaire

## II. PISTE DE SOLUTION

### A. MODELISATION PEM

La modélisation de la production d'hydrogène par PEM n'est plus une découverte, en effet, des études concernant la production d'hydrogène ont vu le jour depuis plusieurs années[5], Le principe lui aussi est à ce jour une technique maîtrisée. Afin d'améliorer cette technologie nous retrouvons un grand nombre d'études concernant la modélisation mathématique PEM, et c'est à travers ces études que nous présentons le schéma électrique équivalent de la fig1 sur laquelle se base la modélisation PEM.

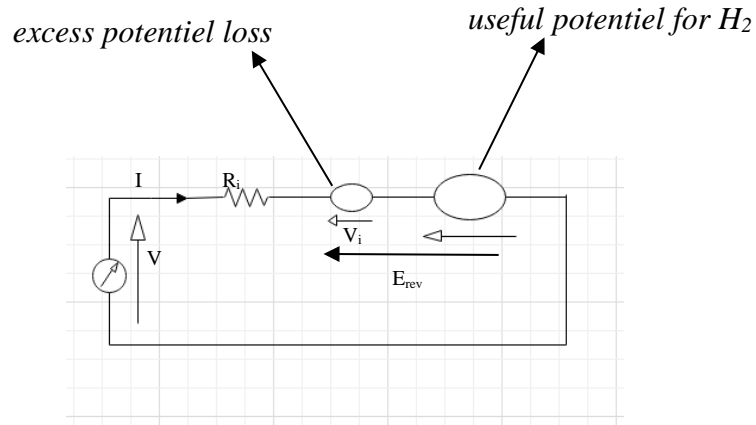


Fig2: Model électrique de l'électrolyse de l'eau PEM

## B. MODELISATION THERMIQUE DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE PAR H2

L'hydrogène stocker est destinée à être utiliser pour la production d'électricité, Lors de cette transformation il en résulte de l'électricité mais aussi une grande quantité de chaleur[12]–[14]. Afin d'évaluer cette énergie thermique nous utilisons l'équation suivante.

$$P_{th} = \pm N_s \times (U - U_{tm}) \times I$$

$P_{th}$  : puissance thermique dégagée par la réaction

$n_c$  : nombre de cellules

$U$  : tension d'une cellule (V)

$U_{tm}$  : tension thermoneutre d'une cellule (V) (= 1,48V)

$I$  intensité (I) provenant des panneaux solaires

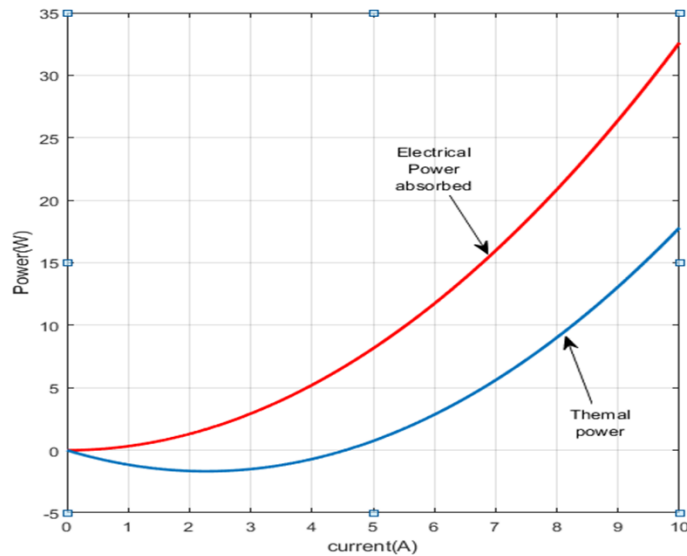


Fig3 : puissance thermique dissipée face à la puissance absorbée

### C. MODELISATION DU SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR

Nous considérons un transfert de chaleur par convection naturelle et à travers la méthode de calcul traditionnelle[15] d'un transfert de chaleur par convection on peut évaluer la quantité de chaleur transmise. Dans la fig4 on schématise le système de transfert. Les équations suivantes sont établies pour la modélisation du transfert thermique.

$$Q = \frac{\Delta t}{R_{th}}$$

$$R_{th} = R_{pem} + R_{tube} + R_{water}$$

$$R_{th} = \frac{1}{AU} = \frac{1}{h_{PEM} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}{2\pi \cdot l \cdot k} + \frac{1}{h_{eau} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l}$$

$R_{th}$  : résistance thermique

$\Delta t$  : différence de température

D diamètre hydraulique, S and P la section et le périmètre d'échange. Les constantes utilisées sont présentées dans le tableau I.

$h_{PEM} = \frac{\lambda \cdot Nu}{D}$  : coefficient de transfert de chaleur par convection

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} : \text{Nombre de Nusselt}$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3 D}{\lambda} : \text{Nombre de Grashof}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} : \text{Nombre de Prandtl}$$

En appliquant la formule de condition aux limites on a

$$Q = \frac{T_{pem} - T_{re}}{\frac{1}{h_{PEM} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l}} = \frac{T_{re} - T_{ri}}{\frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}{2\pi \cdot l \cdot k}} = \frac{T_{ri} - T_{eau}}{\frac{1}{h_{eau} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l}}$$

Dans ce système nous considérons que le flux de chaleur transmis par convection représente toute la puissance thermique dégager par l'électrolyse.

$$P_{th} = \frac{T_{pem} - T_s}{\frac{1}{h_{PEM} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l}} = \frac{T_{re} - T_{ri}}{\frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}{2\pi \cdot l \cdot k}} = \frac{T_{ri} - T_{eau}}{\frac{1}{h_{eau} \cdot 2\pi \cdot r \cdot l}}$$

$T_{pem}$ : température d'électrolyse ;  $T_{re}$ : température face externe ;  $T_{ri}$ : face interne

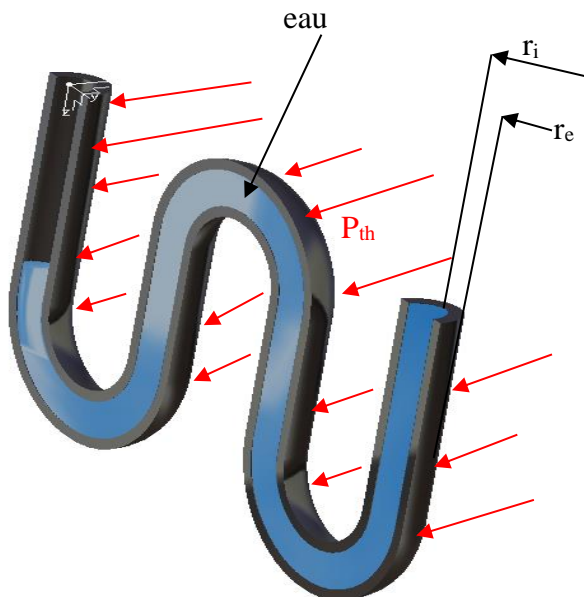


Fig4 : système de transfert de chaleur

constant and parameter	
description	value
$C_p$	4.182 kJ/kg
$\mu$	0.001003 kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\rho$	998.28 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	0.6 w.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>
$\vartheta$	0.16 m/s
Pr <sub>air</sub>	0.722
$m$	1/4
$r_i$	0.00625 m
$r_e$	0.007 m
$\mu_p$	0.000467 kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
L	1.3 m
Gr	10 <sup>9</sup>
C	0.59

Tableau I : constante

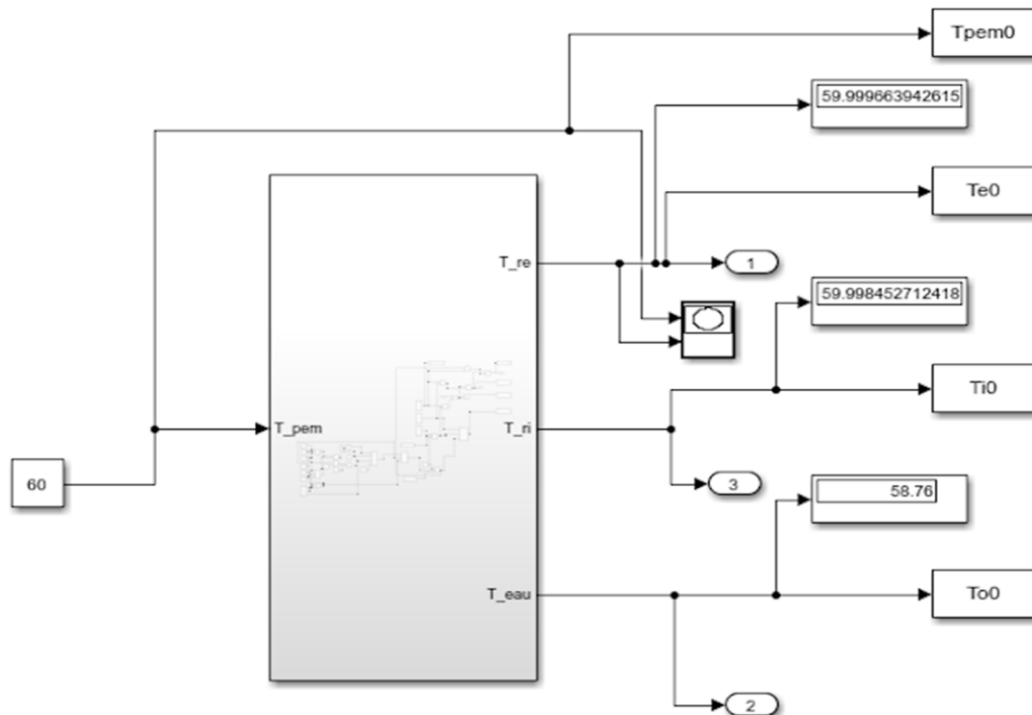


Fig5: modélisation du transfert de chaleur(convection-conduction-convection)

## D. ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans cet article on a représenté un système de cogénération par la récupération de chaleur issue de l'électrolyse de l'eau, Puis on a modélisé l'électrolyse de l'eau PEM destinée à la production d'hydrogène à stocker, pour évaluer la quantité de puissance thermique mise en évidence fig3. Moyennant la méthode de calcul de transfert de chaleur par convection et par conduction nous avons modéliser le transfert de chaleur de l'électrolyse vers l'eau fig5.

Ensuite, à travers cette modélisation nous avons évalué le chauffage de l'eau, en montrant qu'une eau froide de 15 à 26°C circulant à 0.16m/s dans un serpentin en aluminium de 1.3m pouvait atteindre des températures de 57°C. Sachant que dans un bâtiment le chauffage est le plus énergivore, ce système de cogénération peut permettre aux résidences de produire de l'énergie solaire, stocker l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau tout en réchauffant des pièces et maintenir une bonne quantité d'énergie pour l'injection et l'autoconsommation et donc avoir un retour sur investissement rapide.

## REFERENCES

- [1] L. Autoconsommation and C. L. E. S. Professionnels, "L' AUTOCONSOMMATION PAR EDF ENR , UNE INNOVATION AU SERVICE," 2018.
- [2] P. R. D. A. Ction, P. La, Q. D. E. La, C. O. Et, and D. E. L. A. T. Ransition, *INSTALLATIONS AVANT-PROPOS*. 2019.
- [3] F. Garcia and C. Bordons, "Regulation service for the short-term management of renewable energy microgrids with hybrid storage using Model Predictive Control," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 7962–7967, 2013, doi: 10.1109/IECON.2013.6700463.
- [4] M. De L' and H. Fiche, "Fiche 3.2.1 Révision : septembre 2019 Source : AFHYPAC-Th. Alleau Mémento de l'Hydrogène PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU."
- [5] A. P. Bergen and B. A. Sc, "University of Victoria," 1994.
- [6] N. Naseri, S. El Hani, A. Aghmadi, H. Mediouni, I. Abouddrar, and M. Benbouzid, "Solar Photovoltaic Energy Storage as Hydrogen via PEM Fuel Cell for Later Conversion Back to Electricity," *IECON 2019 - 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, no. 10, pp. 4549–4554, 2019, doi: 10.1109/iecon.2019.8927094.
- [7] I. Beausoleil-Morrison and M. Mottillo, "The simulation of a renewable-energy-powered hydrogen-based residential electricity system," *Proc. SimBuild*, pp. 67–74, 2006.
- [8] F. Ayati, M. Belhamel, A. Rebai, and B. Ezzouar, "Modélisation d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire par Electrolyse," 2004.
- [9] H. Zakaria, M. Hamid, and E. M. Abdellatif, "Modelisation of Hydrogen Production using Photovoltaic Electrolysis," *2019 Electr. Veh. Int. Conf. EV 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/EV.2019.8892872.
- [10] M. Albarghot and L. Rolland, "MATLAB / Simulink Modelling and Experimental Results of a PEM Electrolyzer Powered by a Solar Panel," pp. 2–7, 2016.
- [11] A. Beainy, N. Karami, and N. Moubayed, "Simulink model for a PEM electrolyzer based on an equivalent electrical circuit," *2014 Int. Conf. Renew. Energies Dev. Countries, REDEC 2014*, pp. 145–149, 2014, doi: 10.1109/REDEC.2014.7038547.
- [12] A. Beainy, N. Karami, and N. Moubayed, "Simulink model for a PEM electrolyzer based on an equivalent electrical circuit," *2014 Int. Conf. Renew. Energies Dev. Countries, REDEC 2014*, pp. 145–149, 2014, doi: 10.1109/REDEC.2014.7038547.
- [13] B. To and H. A. L. Id, "Etude d' un syst `eme autonome de production d' `energie couplant un champ photovolta `ique , un `electrolyseur et une pile `a combustible : r `ealisation d' un banc d' essai et mod `elisation To cite this version : HAL Id : pastel-00001338," 2005.
- [14] K. Voss, A. Goetzberger, G. Bopp, A. Häberle, A. Heinzl, and H. Lehmberg, "The self-sufficient solar house in Freiburg - Results of 3 years of operation," *Sol. Energy*, vol. 58, no. 1–3, pp. 17–23, 1996, doi: 10.1016/0038-092X(96)00046-1
- [15] "CHAPITRE 6 ÉCHANGEURS DE CHALEUR NORMAG PROZESSTECHNIK 2012 SYSTÈME PF 6.1 Indice A Généralités."