

# Calcul du point de fonctionnement d'une connexion directe entre panneau photovoltaïque et électrolyseur.

## Résumé

Nous avons développé une méthode qui permet de calculer le point de fonctionnement lors d'une connexion directe entre un électrolyseur et un panneau photovoltaïque.

Cette méthode permet de garantir la convergence de l'algorithme afin d'obtenir la résolution du système d'équations en très peu d'itérations. Ceci permet de traiter un nombre important de données afin de simuler la production de l'hydrogène sur une très longue période avec une bonne précision.

La méthode développée permettra par la suite d'optimiser la production de l'hydrogène en utilisant une connexion directe entre le panneau photovoltaïque et l'électrolyseur.

## Introduction

Le stockage de l'énergie est le principal enjeu de notre siècle. L'hydrogène combiné aux piles à combustibles constitue une alternative fiable permettant de garantir une autonomie accrue aux systèmes autonomes utilisant les énergies renouvelables de façon générale [1].

L'étude que nous avons menée permet de simuler la production d'hydrogène en toutes conditions avec différents assemblages. Nous avons étudié la connexion directe entre un panneau photovoltaïque et un électrolyseur. Nous développons un algorithme qui permet de calculer de façon rapide et garantie le point de fonctionnement qui est l'intersection entre la courbe de l'électrolyseur et le panneau photovoltaïque ([2-5]).

L'algorithme nous permet d'estimer la production avec un écart de l'ordre de 5%.

Cet algorithme peut être étendue afin d'optimiser la production de l'hydrogène en utilisant une connexion directe entre le panneau photovoltaïque et l'électrolyseur.

## Modèle mathématique du panneau photovoltaïque

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque peut être exprimé par l'équation suivante (modèle très connu à une diode) :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V - R_s I}{mVT}} - 1 \right) - \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

$I$  est le courant (A),  $V$  voltage (V),  $I_{ph}$  photo-courant (A),  $I_s$  Courant de saturation de la diode (A),  $R_s$  résistance série ( $\Omega$ ),  $R_{sh}$  résistance shunt ( $\Omega$ ),  $m$  facteur de diode,  $VT = \frac{kT}{e}$ .

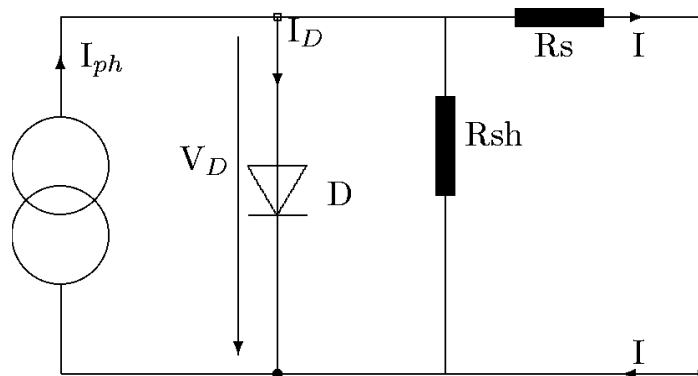


Figure 1. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Afin de calculer les inconnus de l'équation précédente, quelques expérimentations sont nécessaires. Nous traçons le courant en fonction de la tension à différents rayonnements et charge.

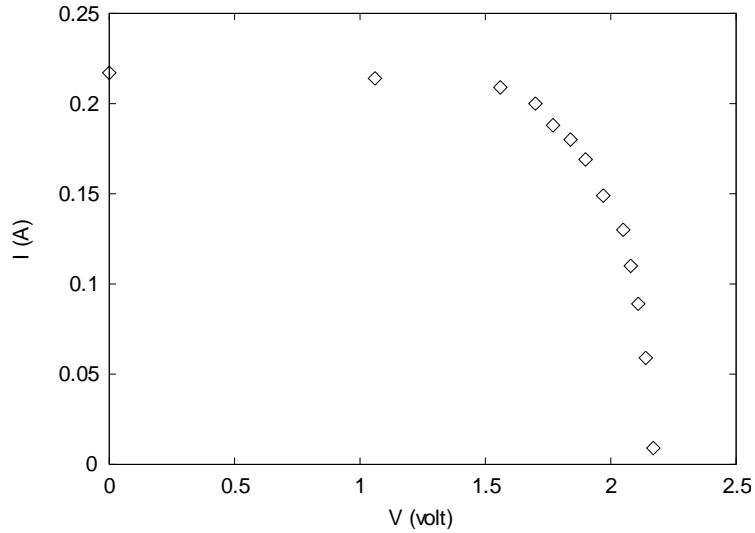


Figure 2. Courbe I-V d'une cellule photovoltaïque.

### Modèle mathématique

Afin de modéliser le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque, nous avons développé la procédure suivante [6]:

En premier supposons que le panneau est idéal, on néglige la résistance shunt et la résistance série, considérons aussi comme première approximation  $I_{ph} = I_{cc}$  (courant de court-circuit).

En ne considérant que les points expérimentaux  $V_i$  supérieurs à  $V_c/2$ , le terme exponentiel est bien supérieur à 1, après simplification de l'équation 1 on obtient la relation suivante:

$$I = I_{sc} - I_s e^{\frac{V}{mVT}} \quad (2)$$

En réarrangeant les termes cette équation peut se linéariser sous la forme:

$$\ln(I_{sc} - I) = \ln(I_s) + \frac{1}{m} \frac{V}{VT} \quad (3)$$

Une régression linéaire est effectuée en ne prenant que les points supérieurs à  $V_c/2$ , on obtient ainsi à partir de la pente et l'ordonnée à l'origine les valeurs de  $m$  et  $I_s$ . Ces valeurs constituent une estimation initiale des valeurs recherchées.

La résolution mathématique de l'équation (1) décrivant le comportement d'une cellule photovoltaïque donne l'équation suivante :

$$I = -\frac{VTm}{Rs} W\left(\frac{RsIsRsh}{VTm(Rs+Rsh)} e^{\frac{Rsh(RsI_{ph}+RsIs+V)}{VTm(Rs+Rsh)}}\right) - \frac{VRs - RsI_{ph}Rsh - RsIsRsh}{Rs(Rs+Rsh)} \quad (4)$$

$W$  est la fonction  $W$  de Lambert, définie par  $W(x) * e^{W(x)} = x$ .

Les détails de la procédure sont dans [6].

### Modèle mathématique de l'électrolyseur

Ayant obtenu expérimentalement la courbe I-V de l'électrolyseur, nous décrivons le comportement électrique par les équations mathématiques adaptées [2,7].

$$V_{cel} < a \quad I_{cel} = bV_{cel}^c \quad (5)$$

$$V_{cel} \dots a \quad I_{cel} = dV_{cel} + e \quad (6)$$

Les équations peuvent être facilement linéarisées, donc la détermination des paramètres inconnus devient aisée :

$$a = 1.6100 \quad b = 1.05932810^{-2} \quad e = -10.516734$$

$$c = 4.9032 \quad d = 6.651525$$

### Calcul de la puissance maximale

Afin d'estimer la puissance maximale, nous calculons sa dérivée, et nous la résolvons pour obtenir l'extremum. L'expression de la puissance maximale est :

$$P = -\frac{VVTm}{Rs} W \left( \frac{RsIsRsh}{VTm(Rs+Rsh)} e^{\frac{Rsh(RsIph+RsIs+V)}{VTm(Rs+Rsh)}} \right) - V \frac{VRs - RsIphRsh - RsIsRsh}{Rs(Rs+Rsh)} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P(V)}{\partial V} = - \left( Rs + \frac{\alpha(Rsh^2 + RshRs)}{(1+\alpha)(Rsh+Rs)} \right) V (Rsh+Rs)^{-1} Rs^{-1} - \frac{VRs + \alpha mVT(Rsh+Rs) - RsRsh(Iph+Is)}{(Rsh+Rs)Rs} \quad (8)$$

avec :

$$\alpha = W(RsIsRshe)^{\frac{Rsh(RsIph+RsIs+V)}{mVT(Rs+Rs)}} m^{-1} VT^{-1} (Rsh+Rs)^{-1} \quad (9)$$

Cette équation peut être résolue par une méthode numérique appropriée [8].

### Calcul du point de fonctionnement et la production de l'hydrogène.

Le point de fonctionnement est l'intersection entre la courbe de l'électrolyseur et la courbe du panneau (figure 3).

Il est possible d'utiliser une méthode numérique classique comme régula-falsi [8] afin de déterminer l'intersection entre les deux courbes, mais le principal inconvénient de cette méthode est sa lenteur. Les méthodes plus rapides, comme point fixe ou newton ne permettent pas de garantir une convergence. Alors, nous avons développé un algorithme qui permet de calculer avec une rapidité accrue le point de fonctionnement.

À partir du point 1 nous nous traçons deux droites vers les points 2 et 3. Le point 1 est l'origine de la courbe de l'électrolyseur, le point 3 correspond au court-circuit et le point 2 correspond au point maximum de puissance estimé à partir du modèle simple sans résistances série et shunt. L'intersection de la droite entre les points 2 et 3 avec la courbe PV permet de

déterminer le point 4, les points 5 et 6 sont l'intersection des courbes 1-2 et 1-3 avec la courbe PV. L'algorithme continue avec les points 4, 5 et 6. À chaque étape nous évaluons l'écart entre les deux courbes. Lorsque l'écart atteint une valeur  $\varepsilon$  l'algorithme s'arrête pour donner la meilleure estimation du point de fonctionnement.

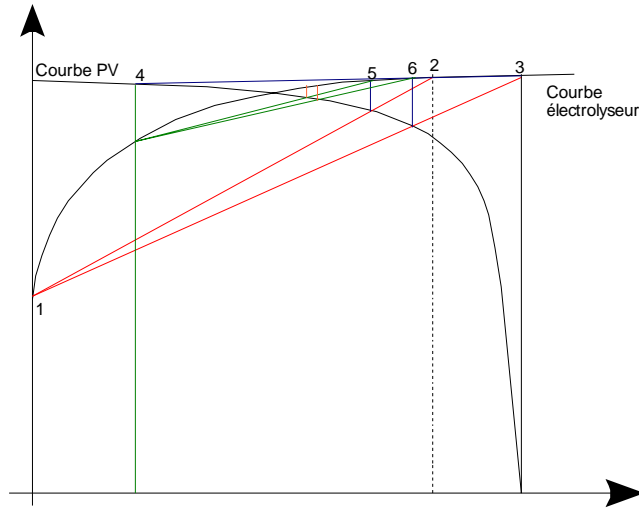


Figure 3. Schéma de l'algorithme de découverte du point de fonctionnement.

### Simulation de la production d'hydrogène

Les différentes grandeurs du panneau  $m$ ,  $VT$ ,  $I_s$ ,  $I_{ph}$  sont calculées à une température et rayonnement de référence, il est possible d'estimer ces variables à différentes températures du panneau et rayonnement solaire, les formules sont les suivantes :

$$m = m_{ref} \frac{T}{T_{ref}} \quad (10)$$

$$VT = T \frac{1.3810^{-23}}{1.610^{-19}} \quad (11)$$

$$I_s = C_0 * T^3 \exp(-Eg/m/VT) \quad (12)$$

$$I_{ph} = C_1 Irr (1 + 0.001(T - T_{ref})) \quad (13)$$

Avec :

$$C_0 = \frac{I_{s_{ref}}}{T_{ref}^3 \exp(-Eg/m_{ref}/VT_{ref})} \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{I_{ph_{ref}}}{Irr_{ref}} \quad (15)$$

L'indice  $ref$  signifie condition de référence,  $25^\circ C$  et  $1000W/m^2$ .

Après avoir déterminé le point de fonctionnement du système, nous avons pu calculer le débit théorique d'hydrogène que nous comparons avec les expérimentations effectuées. L'écart entre les résultats théoriques et simulés est de l'ordre de 5%.

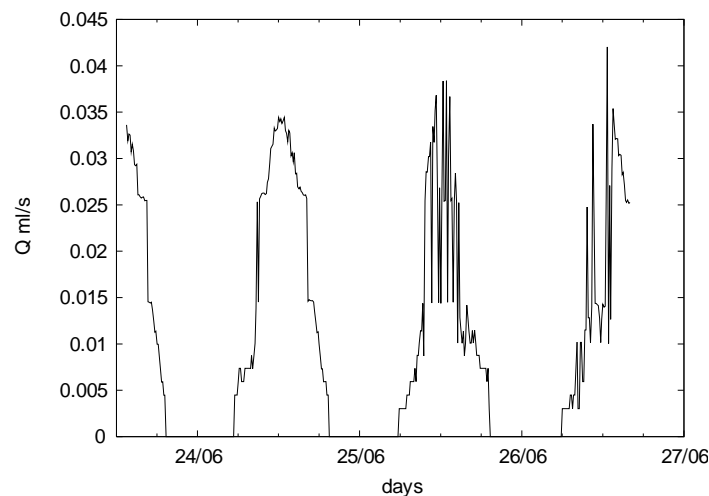


Figure 4. Production d'hydrogène durant 3 jours.

### Conclusion

La méthode que nous avons développée permet d'obtenir le point de fonctionnement du système panneau photovoltaïque – électrolyseur.

La méthode permet de calculer très rapidement le point de fonctionnement du système, l'écart entre les résultats expérimentaux et la simulation est de l'ordre de 5%.

Cette méthode servira de base pour la simulation de la production d'hydrogène pour différents sites et différentes configurations. Il sera alors possible d'optimiser la production d'hydrogène afin de diminuer les coûts de production.

### References

- [1] P. Kauranen, P. Lund, Hydrogen energy storage for photovoltaic power systems, in: Tenth E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 1991, pp. 476–479.
- [2] T. Tani, N. Sekiguchi, M. Sakai, D. Ohta, Optimization of solar hydrogen systems based on hydrogen production cost, *Solar Energy* 68 (2) (2000) 143–149.
- [3] Y. I. Kharkats, E. D. German, V. E. Kazarinov, A. G. Pshenichnikov, Y. Pleskov, Hydrogen production by solar energy: optimization of the plant "solar array + electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy* 11 (1986) 617–621.
- [4] M. P. Rzayeva, O. Salamov, M. Kerimov, Modeling to get hydrogen and oxygen by solar water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 26 (2001) 195–201.
- [5] A. Siegel, T. Schott, Optimization of photovoltaic hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy* 13 (1988) 659–675.
- [6] F. Ayati, A. M'raoui, M. Belhamel, A. Rebai, Modélisation d'un système de production d'hydrogène solaire par électrolyse, *Revue des Energies Renouvelables* 7 (2) (2004) 135–150.
- [7] Ulleberg, Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, *International Journal of Hydrogen Energy* 28 (2003) 21–33.
- [8] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, *Numerical Recipes: The art of scientific computing*, Cambridge University Press, 1996.