

Modélisation d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire par Electrolyse

F. Ayati¹, A. M'Raoui², M. Belhamel² et A. Rebai¹

¹ Faculté des Génies de Procédés et Génie Mécanique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger

² Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

Résumé - *Le but de ce travail est d'établir une méthodologie de modélisation d'un système de production d'hydrogène par électrolyse. L'électricité est fournie par un panneau photovoltaïque. Nous posons l'équation décrivant le comportement électrique d'un panneau, et nous proposons une méthode pour la détermination des différentes grandeurs qui nous permettrons de simuler le comportement du panneau à différentes conditions opératoires. Nous décrivons aussi le comportement électrique d'un électrolyseur PEM, et nous établissons les équations nécessaires pour prévoir la production d'hydrogène du système Module-Electrolyseur en utilisant des données mesurées d'irradiation solaire, et température ambiante.*

Abstract - *Our aim in this work is to set up a modelling methodology for production of hydrogen by electrolysis system. The electricity is delivered by photovoltaic panel. We describe mathematically the electric behaviour of the panel, and we propose a method for determination the different parameters, witch it permits to simulate the behaviour of the panel in different conditions operating. We describe also the electric behaviour of electrolysis PEM, and we establish the equation necessarily to previous the hydrogen production for the system Module-Electrolysis, to do this we use the data measure of irradiance and ambient temperature.*

Mots clés: Cellule photovoltaïque - Electrolyseur - Modélisation - Hydrogène - Energies renouvelables - Pile à combustible.

1. INTRODUCTION

Le stockage saisonnier de l'énergie est une nécessité pour les process utilisant l'énergie solaire ou toute autre énergie renouvelable. L'hydrogène combiné aux piles à combustibles offre une excellente alternative à ce problème. L'objectif de notre travail est d'établir une méthode simple, rapide et efficace pour la prédiction de la production d'hydrogène par source photovoltaïque. Cette méthode permettra par la suite, d'étudier l'optimisation du système de production d'hydrogène afin de rendre ce système plus compétitif sur le plan économique que les systèmes diesel, PV - batteries ou hybride [1].

2. MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Modèle de la cellule

En omettant les détails sur les explications du phénomène physique intervenant dans la conversion de la lumière en électricité, le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figure 1. Ce circuit est constitué d'une source de courant et d'une diode montée en parallèle. La source de courant délivre un courant I_{ph} , directement proportionnel à l'intensité de la lumière, la diode représente la jonction p-n de la cellule solaire.

L'équation I-V du schéma (Fig. 1) déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff est :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

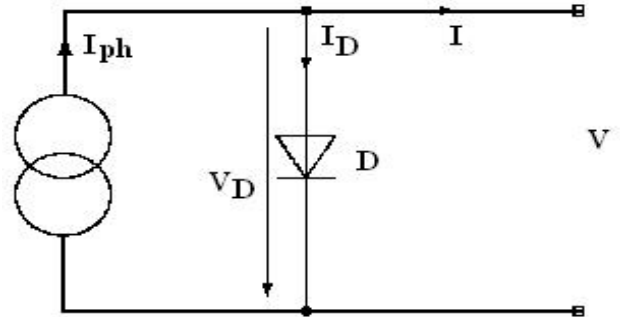


Fig. 1: Schéma électrique équivalent simple d'une cellule photovoltaïque

Deux résistances sont introduites dans le schéma, elles influencent la caractéristique I-V de la cellule :

- R_s Résistance série liée à l'impédance des électrodes et du matériau. Il en résulte une tension V différente de la tension aux bornes de la jonction p-n.

- R_{sh} Résistance shunt correspondant à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction. Il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge.

L'équation complète de la cellule photovoltaïque s'écrira donc (le modèle bien connu à une diode) :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + R_s I}{mV_T}} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

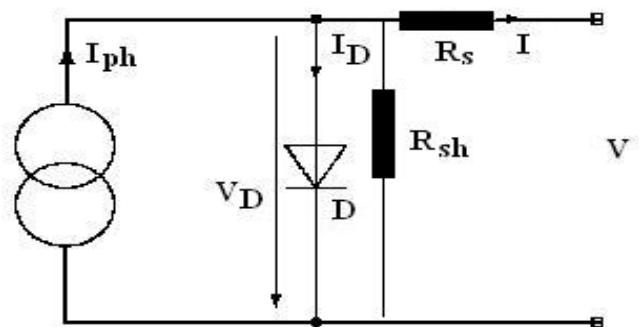


Fig. 2: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

2.2 Procédure expérimentale

En soumettant des cellules photovoltaïques à une lumière et en mettant une charge R à leurs bornes (Fig. 3), on mesure le courant et la tension produite par le module en fonction de divers paramètres (intensité de la lumière, spectre, charge, ...). On s'intéressera notamment au rendement, donné par le rapport entre la puissance P absorbée par le module et la puissance

incidente P_{inc} , et on va aussi chercher la résistance R de la charge idéale correspondant à la puissance maximale fournie pour rendre le rendement maximal.

Le module dont on dispose contient 4 cellules disposées en parallèle. La surface utile est de 50 cm^2 , et les cellules sont au silicium polycristallin.

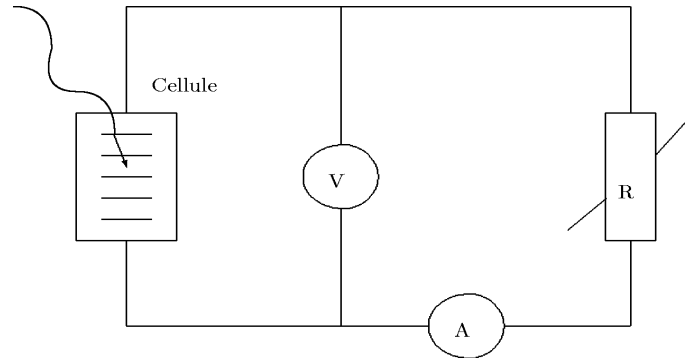


Fig. 3: Schéma du dispositif expérimental

Pour calculer le rendement d'un module, on doit connaître la puissance incidente; elle est mesurée avec un capteur qui donne une tension à la sortie proportionnelle à la puissance de la lumière. En mesurant la tension avec un voltmètre on a directement la valeur de l'irradiation.

En faisant varier la charge R aux bornes de la cellule (module), on retrouve la courbe caractéristique I-V du module (Fig. 4). Les caractéristiques principales (V_c , I_{cc} , P_{max} ,...) peuvent être déduites. Pour la modélisation d'une cellule du panneau, un programme est nécessaire.

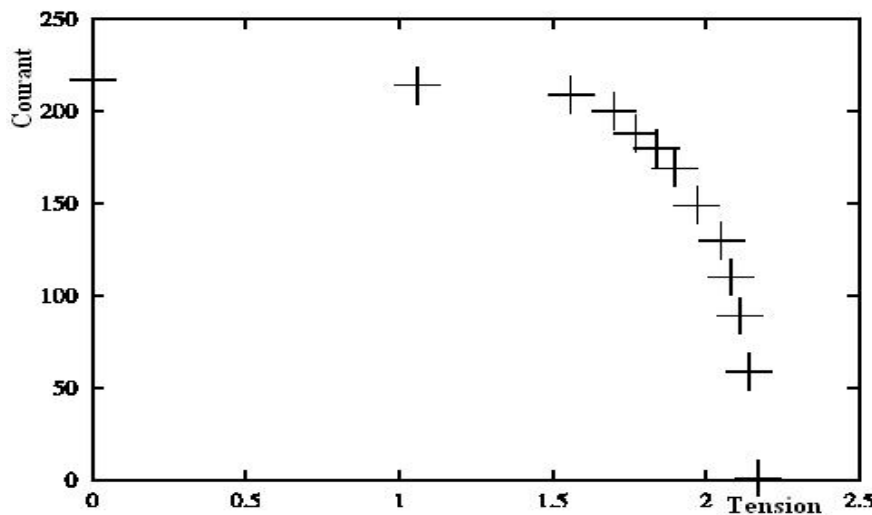


Fig. 4: Courbe I-V du panneau à la lumière du soleil (Irradiation = 717 W/m^2)

La courbe est différente pour chaque source de lumière. A titre d'exemple, pour une lampe à incandescence la valeur de I_s est de $1.84 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, alors que pour la lumière du soleil elle est aux environs de $3.04 \cdot 10^{-4} \text{ A}$.

2.3 Modélisation mathématique

Ayant la courbe caractéristique du module, la recherche des grandeurs inconnues de l'équation 2 est possible. Nous développons l'algorithme suivant.

En premier lieu, supposons que le module soit 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 :

$$I = I_{cc} - I_s e^{V/mV_T} \quad (3)$$

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

$$\text{Ln}(I_{cc} - I) = \text{Ln}(I_s) + \frac{1}{m} \frac{V}{V_T} \quad (4)$$

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 (2) décrivant le comportement d'une cellule photovoltaïque donne l'équation suivante :

$$I = -\frac{mV_T}{R_s} \text{LambertW} \left(\frac{R_s I_s R_{sh}}{mV_T (R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_{sh}(R_s I_{ph} + R_s I_s + V)}{mV_T (R_s - R_{sh})}} \right) - \frac{VR_s - R_s I_{ph} R_{sh} - R_s I_s R_{sh}}{R_s (R_s + R_{sh})} \quad (5)$$

LambertW est la fonction W de Lambert, définie par $W(x) \times e^{W(x)} = x$. On obtient aussi une autre solution par rapport à la tension :

$$V = -mV_T \text{LambertW} \left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} - I + I_s)}{mV_T}} \right) - IR_s + (I_{ph} + I_s - I)R_{sh} \quad (6)$$

Bien que la seconde solution apparaît plus simple, d'un point de vue numérique la première est meilleure, ceci est causé par la précision de calculs des compilateurs, qui est limitée. Chaque type réel a une plage définie, la seconde solution pose problème, car généralement la valeur de R_{sh} est très grande, augmentée d'un terme exponentiel, celle-ci dépasse la limite admise pour les types réels des logiciels de calculs. Donc pour le calcul numérique, on utilisera la première expression.

A partir de l'équation 6, on peut déduire l'équation décrivant la tension de circuit ouvert V_c :

$$V_c = I_{ph} R_{sh} - mV_T \text{LambertW} \left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{mV_T}} \right) + I_s R_{sh} \quad (7)$$

Et l'intensité du courant en court-circuit est exprimée par la relation :

$$I_c = \frac{mV_T}{R_s} \text{LambertW} \left(\frac{R_s I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_s)}{mV_T (R_s + R_{sh})}} \right) + \frac{R_{sh} (I_{ph} + I_s)}{(R_s + R_{sh})} \quad (8)$$

La tangente au point V_c est :

$$\left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{I=0} = -R_s + R_{sh} \left(\frac{\text{Lambert} \left(I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{m V_T}} \right)}{1 + \text{Lambert} \left(I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{m V_T}} \right)} - 1 \right) \quad (9)$$

A partir des estimations initiales des paramètres I_{ph} , I_s et m ainsi qu'en combinant l'équation 5, nous obtenons une estimation initiale de la résistance shunt par l'expression :

$$R_{sh} = -V_c \left(-I_{ph} - I_s + I_s e^{\frac{V_c}{m V_T}} \right)^{-1} \quad (10)$$

Aussi en combinant l'équation 6, nous obtenons une estimation initiale de la résistance série, la valeur de la tangente est déduite à partir des résultats expérimentaux.

$$R_s = - \frac{\left(R_{ph} + tg + tg \text{Lambert W} \left(\frac{I_s R_{sh}}{m V_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{m V_T}} \right) \right)}{\left(1 + \text{Lambert W} \left(\frac{I_s R_{sh}}{m V_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{m V_T}} \right) \right)} \quad (11)$$

Cette gymnastique mathématique permet d'avoir une estimation initiale de toutes les grandeurs intervenant dans la modélisation du panneau photovoltaïque. Une méthode des moindres carrés non-linéaire est à appliquer pour obtenir les valeurs finales de ces paramètres.

Dans ce but, on a opté pour l'algorithme de Powell [3].

Avec cette méthode, pour le panneau dont nous disposons, nous avons obtenu les résultats suivants :

$$R_s = 6 \cdot 10^{-17} \Omega, R_{sh} = 10^{15} \Omega, I_s = 3.3159 \cdot 10^{-6} \text{ A}, I_{ph} = 0.217969 \text{ A}, m = 1.9705.$$

Ces résultats démontrent que le module utilisé peut être considéré comme idéal. La résistance série est très faible et la résistance shunt très importante. Donc, le courant I_s est très faible devant le courant photovoltaïque I_{ph} . De plus le facteur d'idéalité est proche de 2.

Nous abordons dans ce qui suit la modélisation du second élément du système de production d'hydrogène, l'électrolyseur.

3. MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR

L'électrolyseur que nous utilisons est de type PEM (Proton Exchange Membrane). De manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en

hydrogène et oxygène gazeux. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible.

3.1 Procédure expérimentale

L'électrolyseur est connecté au générateur DC. Il est préférable de débiter l'expérience avec le voltage le plus élevé $U = 2 \text{ V}$ et de diminuer progressivement. En début d'opération la valeur du courant peut être élevée, après environ 1 minute le système devient stable.

Les valeurs du courant et de la tension sont enregistrées et la courbe caractéristique de l'électrolyseur est tracée (Fig. 5).

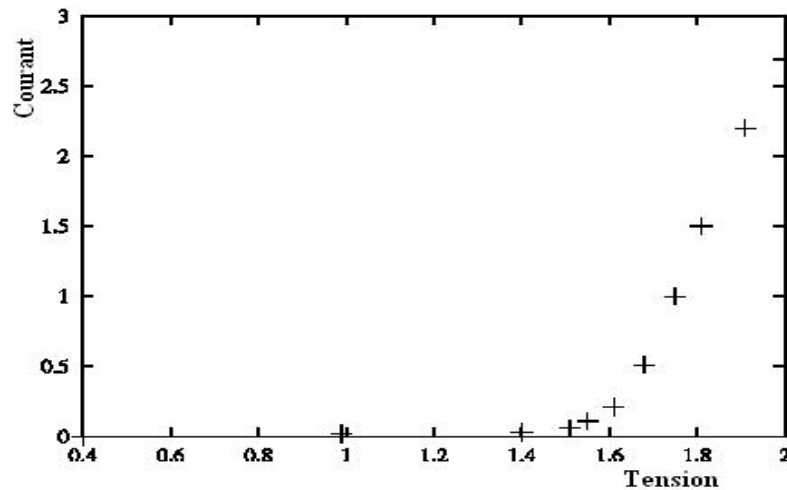


Fig. 5: Courbe I-V de l'Electrolyseur

3.2 Modélisation de l'électrolyseur

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

Soit " a " le coefficient correspondant à l'établissement du régime de l'électrolyseur :

$$\begin{aligned} V_{\text{cel}} < a & \quad I_{\text{cel}} = b V_{\text{cel}}^c \\ V_{\text{cel}} \geq a & \quad I_{\text{cel}} = d V_{\text{cel}} + e \end{aligned} \quad (12)$$

Nous obtenons ainsi les coefficients suivants :

$$a = 1.6100 ; b = 1.059328 \cdot 10^{-2} ; e = -10.516734 ; c = 4.9032 ; d = 6.651525$$

L'algorithme utilisé dans ce cas pour obtenir ces coefficients est une modification de l'algorithme de Csendes [4] d'optimisation globale par la méthode des intervalles. Cette méthode est très puissante et permet de converger vers la solution en peu de temps comparé à d'autres techniques, mais la principale difficulté est l'estimation initiale de l'ordre de grandeur des coefficients.

4. SIMULATION DU SYSTEME MODULE - ELECTROLYSEUR

Après obtention des modèles mathématiques décrivant le comportement de l'électrolyseur et du module photovoltaïque, nous nous intéressons au système constitué de ces deux éléments. Nous déterminerons le point de fonctionnement, la puissance maximale du module.

De ces paramètres, nous déduirons le rendement et le facteur de forme du module, puis nous estimerons la production en hydrogène de l'électrolyseur.

Les différentes grandeurs du module m , V_T , I_s , I_{ph} sont calculées à une température et irradiation de référence. Connaissant leur dépendance, il est possible d'estimer ces variables à différentes températures du panneau et irradiation solaire, les formules sont les suivantes :

$$\begin{aligned} m &= m_{ref} \frac{T}{T_{ref}} \\ V_T &= \frac{1.38 \cdot 10^{-23}}{1.6 \cdot 10^{-19}} T \\ I_s &= C_0 \times T^3 \exp(-E_g / m/V_T) \\ I_{ph} &= C_1 Irr (1 + 0.001(T - T_{ref})) \end{aligned} \quad (13)$$

avec :

$$C_0 = \frac{I_{s_{ref}}}{T_{ref}^3 \exp(-E_g / m/V_{T_{ref}})} \quad \text{et} \quad C_1 = \frac{I_{ph_{ref}}}{Irr_{ref}}$$

4.1 Calcul de la puissance maximale du module

La puissance est le produit $I \times V$. Pour calculer la puissance maximale, nous calculons sa dérivée par rapport à V , puis nous résolvons cette équation pour obtenir l'extremum, l'expression de la puissance est :

$$P = V m V_T R_s \text{ Lambert } W \left(\frac{R_s I_s R_{sh}}{m V_T (R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_{sh} (R_s I_{ph} + R_s I_s + V)}{m V_T (R_s + R_{sh})}} \right) - V \frac{V R_s - R_s I_{ph} R_{sh} - R_s I_s R_{sh}}{R_s (R_s + R_{sh})} \quad (14)$$

Sa dérivée est donnée par la relation:

$$\frac{\partial P(V)}{\partial V} = - \frac{\left(R_s + \frac{\alpha (R_{sh}^2 + R_{sh} R_s)}{(1-\alpha)(R_s + R_{sh})} \right)}{R_s (R_s + R_{sh})} - \frac{V R_s + \alpha m V_T (R_s + R_{sh}) - R_s R_{sh} (I_{ph} + I_s)}{R_s (R_s + R_{sh})} \quad (15)$$

avec :

$$\alpha = \text{Lambert } W \left(\frac{R_s I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh} (R_s I_{ph} + R_s I_s + V)}{m V_T (R_{sh} + R_s)}}}{m V_T (R_{sh} + R_s)} \right)$$

Cette équation est résolue par la méthode de Regula-Falsi [3], les bornes de l'intervalle sont 0 et V_c calculé par l'équation (5). Le point correspondant à la puissance maximale V_{max} , I_{max} ainsi calculé, on peut estimer le rendement du panneau, le facteur de forme et la résistance de charge idéale :

$$\begin{aligned} \text{Rendement} &= \frac{I_{\max} V_{\max}}{\text{Surface} \times \text{Irradiance}} \\ \text{Facteur de forme} &= \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_c V_c} \\ R_{\text{idéale}} &= \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \end{aligned} \quad (16)$$

4.2 Calcul du point de fonctionnement et de la production

Le point de fonctionnement est l'intersection de la courbe I-V du panneau avec la courbe de l'électrolyseur (Fig. 6). Mathématiquement ceci revient à résoudre le système d'équations constitué de l'équation du module (4) et des deux équations de l'électrolyseur (équation 12). Nous utilisons pour cela la méthode de Newton en multi dimension [3]. Nous obtenons ainsi le courant et la tension de fonctionnement du système I_f et V_f .

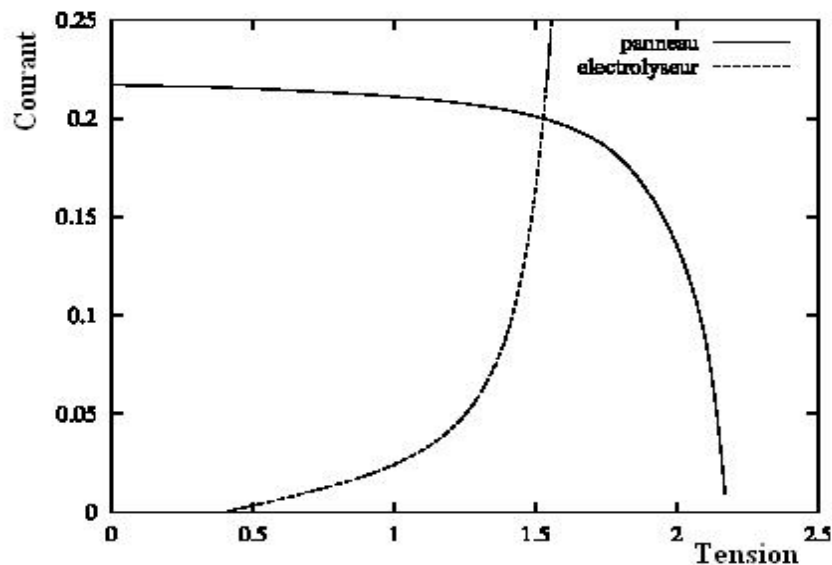


Fig. 6: Détermination graphique du point de fonctionnement

La production (en ml/s) est obtenue en utilisant la loi des gaz parfait :

$$\begin{aligned} Q_{\text{hydrogène}} &= \frac{R T I_f}{n F P} \\ Q_{\text{hydrogène}} &= \frac{8.32 I_f T}{2 \times 96500 \times 1.03210^{-1}} \end{aligned} \quad (17)$$

4.3 Influence de l'irradiation solaire sur le module

Nous avons fait varier l'irradiation solaire en maintenant une température constante. La figure 7 montre l'influence de l'irradiation sur la courbe I-V du module solaire.

4.4 Influence de la température sur le module

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu une irradiation constante à différentes températures, on remarque que plus la température augmente plus la tension de court-circuit diminue, par contre le courant photovoltaïque augmente légèrement (Fig. 8).

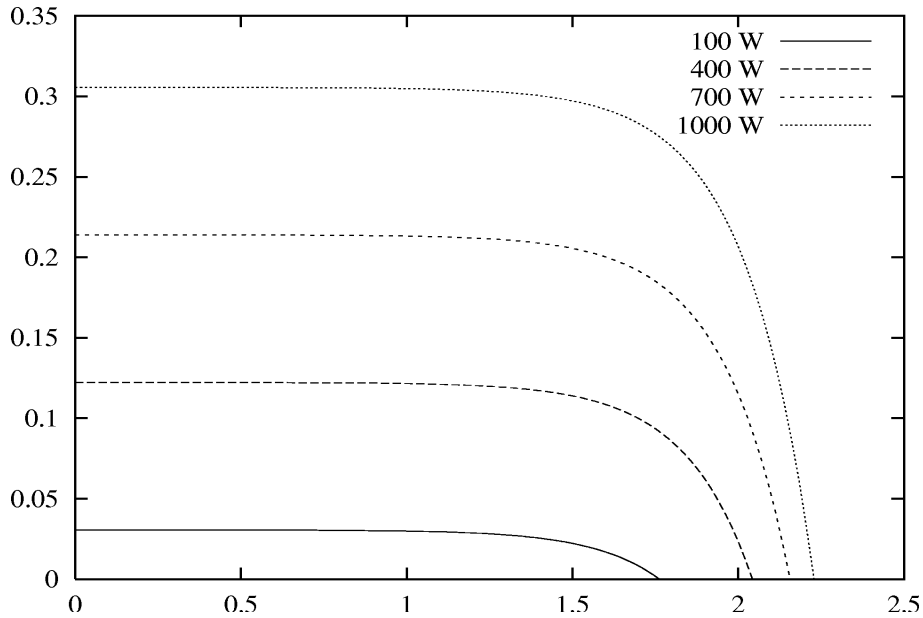


Fig. 7: Influence de l'irradiation solaire sur le module

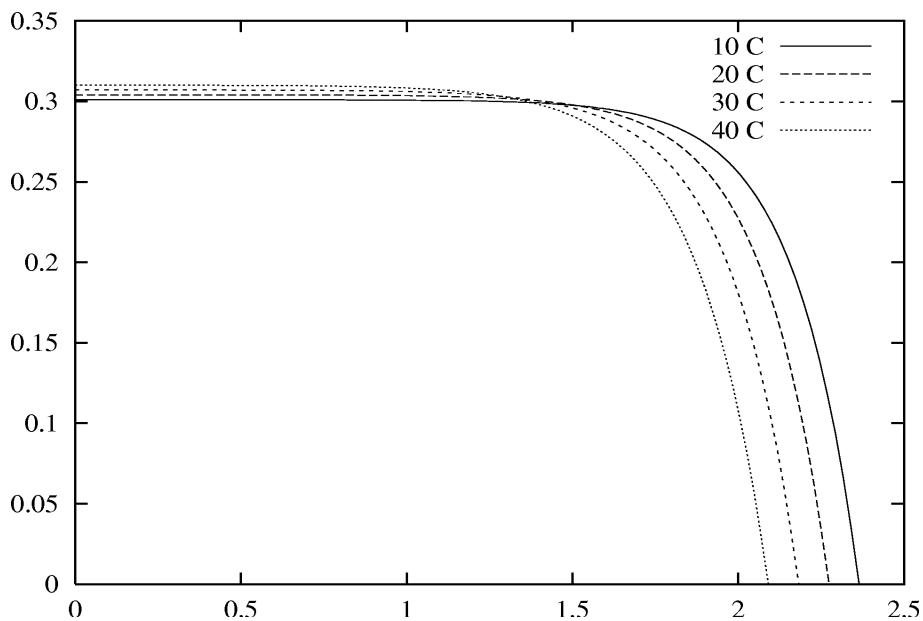


Fig. 8: Influence de la température sur le module

4.5 Simulation de la production d'hydrogène

Ayant effectué des mesures de l'irradiation solaire et de la température du module photovoltaïque (Fig. 9 et 10), nous effectuons des simulations de la production d'hydrogène solaire pas électrolyse. La figure 11 représente le résultat de la simulation de la puissance maximale du panneau, la figure 12 son rendement et la figure 13 une simulation de la production d'hydrogène en ml/s.

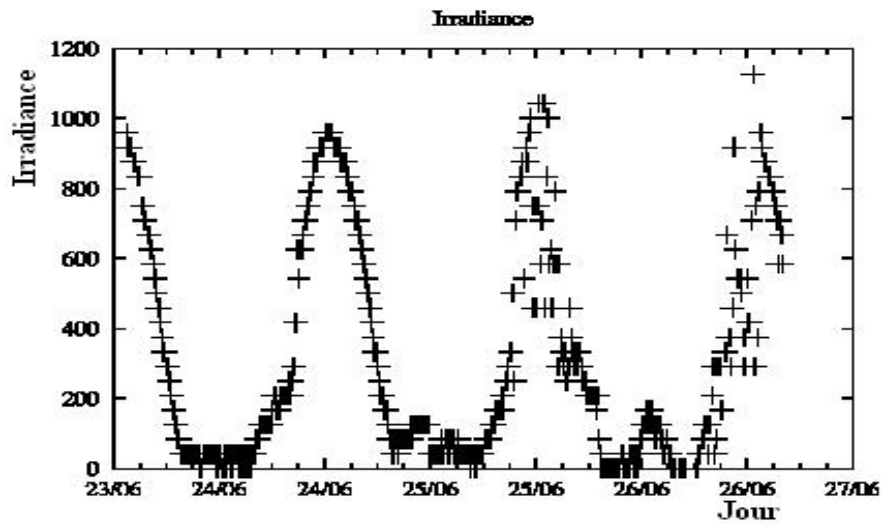


Fig. 9: Irradiation solaire en fonction du temps (04 jours)

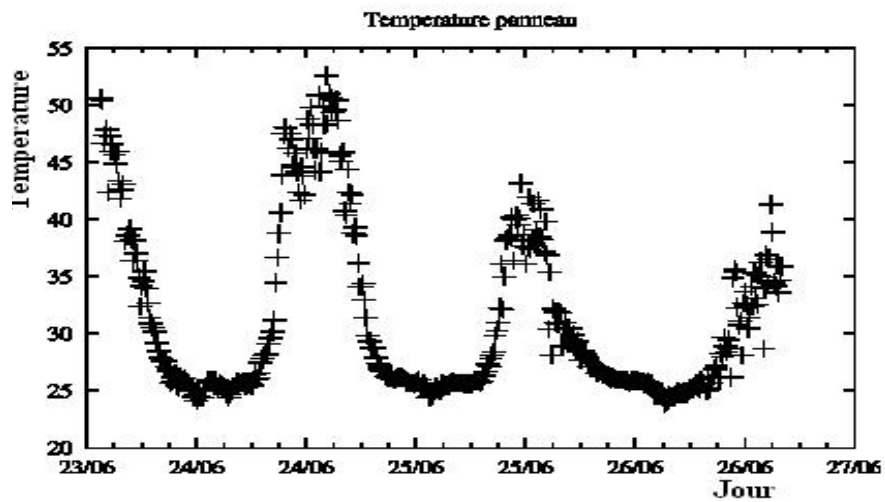


Fig. 10: Température du module en fonction du temps (04 jours)

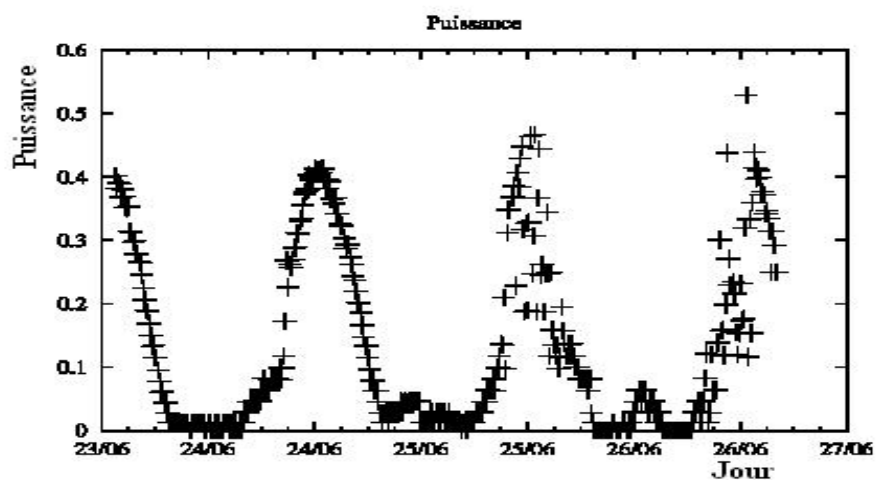


Fig. 11: Simulation de la puissance maximale obtenue du module (04 jours)

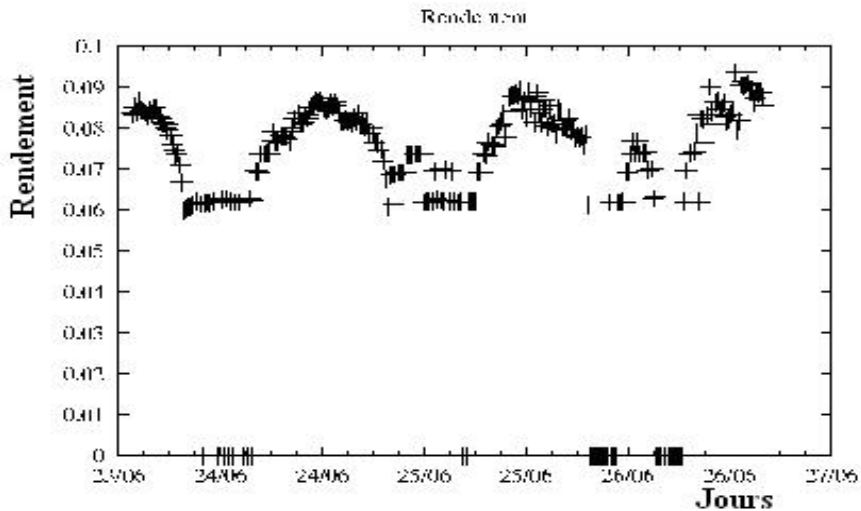


Fig. 12: Simulation du rendement du module (04 jours)

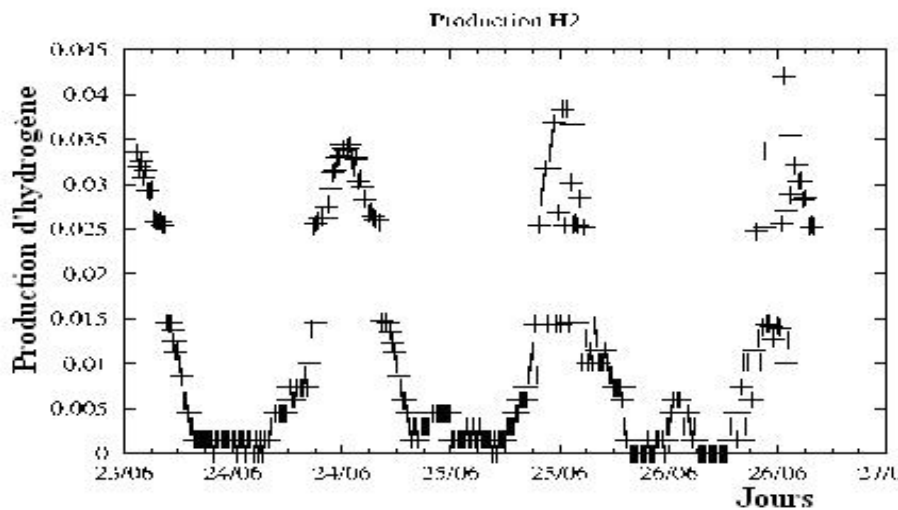


Fig. 13: Simulation de la production d'hydrogène

5. RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION ET DISCUSSIONS

Le programme développé nous permet de faire varier à volonté les paramètres météorologiques ainsi que les dimensions du panneau pour obtenir toutes des propriétés électriques du panneau et la production d'hydrogène désirée.

Comme exemple, nous regroupons quelques résultats pour trois cas différents.

Dans le tableau 1, nous regroupons les caractéristiques électriques du module utilisé, ainsi que la production annuelle d'hydrogène attendue

Tableau 1: Caractéristiques électriques du panneau et prévision de la production annuelle d'hydrogène pour une température de 30 °C

Irr (W/m ²)	I _{cc} (A)	V _{co} (V)	V _{max} (V)	I _{max} (A)	R _{opt} (Ω)	P _{max} (W)	FF	Rd	Production (l/an)
100	0,031	1,709	1,299	0,027	49,009	0,034	0,657	0,069	113,375

200	0,061	1,851	1,425	0,054	26,561	0,076	0,673	0,076	222,239
300	0,092	1,935	1,500	0,081	18,514	0,121	0,682	0,081	326,689
400	0,123	1,994	1,553	0,108	14,317	0,168	0,688	0,084	427,078
500	0,154	2,040	1,594	0,136	11,722	0,217	0,692	0,087	444,985
600	0,184	2,078	1,627	0,164	9,951	0,266	0,695	0,089	781,641
700	0,215	2,109	1,656	0,191	8,662	0,317	0,698	0,090	796,553
800	0,246	2,137	1,681	0,219	7,680	0,368	0,701	0,092	919,674
900	0,276	2,161	1,703	0,247	6,906	0,420	0,703	0,093	1042,758
1000	0,307	2,183	1,722	0,274	6,279	0,472	0,705	0,094	1165,803

5.1 Résultats - cas 1

Pour le premier cas, nous avons fait varier l'irradiation et le nombre de cellules en parallèle N_p pour augmenter le courant généré par le module tout en maintenant la température de la cellule et le nombre de cellules en série N_s constant.

Tableau 2: Résultats de la variation de l'irradiation et du nombre de cellules en parallèle

Irr (W/m ²)	T (°C)	N _s	N _p	V _{co} (V)	I _{cc} (A)	P _{max} (W)	FF	Rd	V _f (V)	I _f (A)	Prod. (l/an)
100	20	4	40	1,816	1,216	1,492	0,676	0,075	1,674	0,619	2433,894
200	20	4	36	1,94	2,9	2,951	0,690	0,082	1,776	1,294	5088,142
300	20	4	32	2,034	2,918	4,143	0,698	0,086	1,848	1,775	6978,385
400	20	4	28	2,092	3,405	5,007	0,703	0,089	1,899	2,113	8307,897
500	20	4	24	2,136	3,648	5,510	0,707	0,092	1,932	2,337	9187,854
600	20	4	20	2,172	3,648	5,628	0,710	0,094	1,950	2,454	9649,103
700	20	4	16	2,203	3,405	5,347	0,713	0,095	1,950	2,451	9639,102
800	20	4	12	2,230	2,918	4,652	0,715	0,097	1,925	2,287	8992,351
900	20	4	8	2,253	2,189	3,536	0,717	0,098	1,864	1,879	7389,917
1000	20	4	1	2,274	0,304	0,497	0,719	0,099	1,625	0,292	1149,527

o *Constatations et discussions*

L'idéal serait d'avoir un maximum de puissance délivrée par le module pour une surface minimale. Il n'est pas possible d'établir un consensus entre ces deux facteurs, puisque la puissance augmente avec la surface du module.

la surface minimale dans notre cas est celle choisie pour une irradiation maximale de 1000 W/m², il s'agit d'un choix purement économique, la production annuelle est dans ce cas minimale, nous concluons que ce système n'est pas performant.

Par ailleurs, pour une irradiation minimale (100 W/m² → temps nuageux), la production est meilleure que pour un temps bien ensoleillé (1000 W/m²), mais il lui correspond une surface du module maximale, de même, le système n'est pas performant.

Selon les résultats de ce tableau, le système idéal correspond à une irradiation moyenne de 600 W/m², la puissance délivrée par le module est maximale, et par conséquent la production est également maximale, la surface optimale du module correspondant est de $(2.5 \times 5) \times 4 \times 20 = 0.1 \text{ m}^2$

5.2 Résultats - Cas 2

Dans ce deuxième cas, nous avons augmenté la température de la cellule à 35 °C, au lieu de 20°C considérée dans le cas a), les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3: Résultats de l'augmentation de la température avec variation de l'irradiation et du nombre de cellules en parallèle

Irr (W/m ²)	T (C°)	N _s	N _p	V _{co} (V)	I _{cc} (A)	P _{max} (W)	FF	Rd	V _f (V)	I _f (A)	Prod. (l/an)
100	35	4	40	1,655	1,234	1,321	0,647	0,066	1,614	0,220	909,445
200	35	4	36	1,800	2,222	2,655	0,664	0,074	1,704	0,818	3382,364
300	35	4	32	1,885	2,962	3,759	0,673	0,078	1,770	1,255	5187,009
400	35	4	28	1,945	3,456	4,567	0,679	0,082	1,818	1,575	6511,071
500	35	4	24	1,992	3,703	5,045	0,684	0,084	1,852	1,803	7454,317
600	35	4	20	2,030	3,703	5,170	0,688	0,086	1,874	1,947	8049,465
700	35	4	16	2,062	3,456	4,924	0,691	0,088	1,882	1,999	8261,867
800	35	4	12	2,090	2,962	4,294	0,693	0,089	1,871	1,925	7958,798
900	35	4	8	2,115	2,222	3,269	0,696	0,091	1,830	1,653	6833,803
1000	35	4	1	2,137	0,309	0,460	0,698	0,092	1,624	0,282	1165,840

o *Constatations et discussions*

Comparé aux résultats du tableau 2, nous avons changé seulement la température du module, la première conséquence est la diminution du rendement de ce dernier, pour 20 °C le rendement du module est compris entre 7.5 % et 9.9 %, pour 35 °C, le rendement est compris entre 6.6 % et 9.2 %, ceci est dû au fait que les propriétés électriques des semi-conducteurs sont très sensibles à la température.

L'augmentation de la température influe considérablement sur les performances du module. La puissance maximale a diminué de 5.17 W pour un flux lumineux de 600 W/m² au lieu de

5.628 W. Le déplacement du point de puissance maximale implique que l'impédance de charge doit être modifiée pour que l'on puisse extraire toute la puissance disponible.

5.3 Résultats - Cas 3

Par ailleurs, le programme développé nous permet de simuler, puis d'optimiser un système de production d'hydrogène par voie solaire de plus grande capacité.

Sachant que les caractéristiques techniques d'un module photovoltaïque commercial sont données pour une irradiation solaire de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [5], nous avons dans le tableau 4 voulu choisir notre système en optant pour une production approximative de 45000 l/an.

Pour cela, nous avons d'abord déterminé les propriétés d'une seule cellule à savoir $N_s = 1$ et $N_p = 1$.

Tableau 4: Résultats de la variation du nombre de cellules en parallèle et du nombre de cellules en série pour une irradiation et une température de référence

Irr (W/m^2)	T ($^\circ\text{C}$)	N_s	N_p	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	P_{max} (W)	FF	Rd	V_f (V)	I_f (A)	Prod. (l/an)
1000	25	1	1	0,557	0,306	0,121	0,712	0,097	0,557	0,001	2,404
1000	25	1	4	0,557	1,222	0,485	0,712	0,097	0,557	0,001	2,405
1000	25	1	24	0,557	7,333	2,908	0,712	0,097	0,557	0,001	2,406
1000	25	1	36	0,557	10,999	4,362	0,712	0,097	0,557	0,001	2,406
1000	25	6	36	3,343	10,999	26,169	0,712	0,097	2,877	8,622	34483,018
1000	25	6	90	3,343	27,497	65,423	0,712	0,097	3,193	10,719	42867,486

La puissance maximale nécessaire à la production annuelle de 42867.486l est alors de 65,423 W. Cette production est obtenue en utilisant un module de surface égale à $6 \times 90 \times 2.5 \times 5 = 0.675 \text{ m}^2$.

6. CONCLUSION

L'hydrogène est une source d'énergie non polluante. L'électrolyse de l'eau est le moyen le plus propre pour l'obtenir. Dans cette étude, la technologie liée à l'hydrogène solaire a été évaluée d'un point de vue technique. Les principaux éléments constituant le système n'étant pas encore commercialisés, l'évaluation économique de ce type de système a été délibérément omise.

Nous avons étudié le comportement d'un panneau photovoltaïque et nous avons établi les équations et méthodes mathématiques nécessaires à la détermination de sa caractéristique I-V et pour sa prédiction à différentes conditions opératoires. Nous avons aussi établi les équations nécessaires à la prédiction de la production d'hydrogène solaire par électrolyse en utilisant le panneau photovoltaïque comme source électrique.

Le fonctionnement optimal du module photovoltaïque, est étroitement lié aux conditions climatiques d'une part et à la charge utilisée d'autre part. Concernant les conditions climatiques, le panneau doit être placé dans une localité à forte insolation de sorte à extraire le maximum de puissance tout en tenant compte que l'augmentation de la température ambiante diminue le rendement du module.

Le deuxième paramètre ayant une influence sur le choix du panneau est la charge utilisée, l'optimisation du design du panneau passe par la minimisation de la charge. Pour notre système, la charge n'est autre que l'électrolyseur, ce dernier doit pouvoir fonctionner à puissances variables.

L'efficacité de l'électrolyseur est améliorée par l'augmentation de la température de fonctionnement. La valeur de la température étant limitée par la structure technique de l'électrolyte qui est dans notre cas une membrane échangeuse de proton. Les débits d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur sont inhérents à la température de fonctionnement et à l'état saturé ou non de la membrane. Une régulation on/off de l'électrolyseur est recommandée pour les différentes saisons.

Nous fixons comme objectifs d'étudier d'autres sources électriques (moteurs stirling, éolienne, ...) pour comparer et optimiser économiquement la production d'hydrogène par énergies renouvelables.

NOMENCLATURE

a	Facteur de correction	P_{\max}	Puissance maximale du module
a, b, c, d, d, e	Constante à température ambiante expérimentale	P	Pression atmosphérique
C_0	Constante réduite du courant de saturation	Q	Charge de l'électron $= 1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
C_1	Constante réduite du photocourant	$Q_{\text{hydrogène}}$	Production théorique d'hydrogène
F	Constante de Faraday	R_s	Résistance série du module
I_{cc}	Intensité de court-circuit	R_{sh}	Résistance shunt du module
I_{cel}	Intensité de la cellule d'électrolyse	R_{opt}	Résistance optimale
I_{\max}	Intensité maximale du module	R	Constante des gaz parfaits
I_{rr}	Irradiation solaire	S	Surface du module
I_f	Intensité au point de fonctionnement	T	Température ambiante
I	Intensité fournie par la pile	T_{ref}	Température de référence
I_{ph}	Photocourant	t	Temps correspondant à la production du volume v
I_{s1}	Courant de saturation de la diode1	v	Volume d'hydrogène produit
I_{s2}	Courant de saturation de la diode2	V_{co}	Tension de circuit ouvert
$I_{rr,ref}$	Irradiation de référence égale à 1000 W/m^2	V_{\max}	Tension maximale du module
$I_{s,ref}$	Courant de saturation \Rightarrow à l'irradiation de référence	V_{cel}	Tension de la cellule d'électrolyse
k	Constante de Boltzman $K = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	m_{ref}	Facteur d'idéalité à la température de référence
m	Facteur d'idéalité (1.5)	V_T	Potentiel thermique

REFERENCES

- [1] P.S. Kauranen and P.D. Lund, "*Hydrogen Energy Storage for Photovoltaic Power Systems*", Tenth E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 476-479, 1991.
- [2] T. Tani, N. Sekiguchi, M. Sakai and D. Ohta, "*Optimization of Solar Hydrogen Systems Based on Hydrogen Production Cost*", Solar Energy, Vol. 68, N°2, pp. 143-149, 2000.
- [3] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling and B. Flannery, Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 1996.
- [4] T. Csendes, "*Subdivision Direction Selection In Interval Methods For Global Optimization SIAM*", Journal on Numerical Analysis, Vol. 34, N°3, pp. 922-938, 1997.
- [5] J.R. Bolton, "*Solar Photoproduct Ion of Hydrogen - A Technology Assessment*", The World Directory of Renewable Energy Suppliers and Services, 1997.
- [6] F. Ayati, "*Technologie de Production d'Hydrogène Appliquée à la Pile à Combustible*", Mémoire de Magister, USTHB, Janvier 2004.