

Suivi du point maximal de puissance de cellules photovoltaïques par la méthode d'optimisation multi-unités

Lyne WOODWARD¹, William SHADEED, Michel PERRIER, Bala SRINIVASAN

École Polytechnique de Montréal, Génie Chimique
C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal, Canada, H3C 3A7

Lyne.Woodward@polymtl.ca
<http://www.polymtl.ca>

Résumé— De nos jours, l'énergie solaire gagne en importance. Dans ce type de systèmes, la puissance délivrée par des cellules photovoltaïques peut être maximisée par l'ajustement de la charge. Plusieurs algorithmes ont été proposés pour effectuer cet ajustement. L'optimisation multi-unités est une méthode récente d'optimisation en temps réel qui s'applique à des procédés contenant plusieurs unités semblables. Ces unités sont opérées à des valeurs d'entrée légèrement différentes et le gradient est estimé par la différence obtenue entre les sorties de ces unités. Cette méthode d'optimisation est utilisée ici pour le suivi du point de puissance maximal de deux circuits constitués d'une cellule photovoltaïque et d'une résistance variable. La performance de cet algorithme est comparée à celle obtenue par l'utilisation de la méthode classique de perturbation et d'observation. Les résultats expérimentaux démontrent une meilleure performance de la méthode d'optimisation multi-unités comparativement à la méthode de perturbation et d'observation : une plus grande vitesse de convergence et l'absence d'oscillations autour du point de convergence.

Mots-clés— conversion optimale d'énergie, énergie solaire, optimisation en temps réel, régulateur d'extremum, cellules photovoltaïques

I. INTRODUCTION

Avec le prix du pétrole de plus en plus élevé, les énergies renouvelables gagnent en intérêt. L'énergie solaire entre autres, est une source d'énergie qui comporte certains avantages. C'est une source d'énergie propre qui s'avère économiquement avantageuse [1]. Toutefois, les conditions climatiques et la variation d'ensoleillement peuvent affecter le rendement énergétique des systèmes solaires. Leur performance peut être améliorée mécaniquement par l'orientation des cellules photovoltaïques en fonction de la trajectoire du soleil [2]. Cette façon de faire implique un coût en énergie pour déplacer les cellules. La puissance délivrée peut également être optimisée par l'ajout d'un module de conversion optimale d'énergie. Ces modules utilisent un algorithme permettant le suivi en temps réel du point d'opération optimal (MPPT : Maximum Power Point Tracking). Ainsi, la puissance dissipée par la cellule photovoltaïque dans une charge est maximisée pour être emmagasinée et réutilisée par la suite.

Ce type de module peut minimiser les coûts d'investissement reliés à l'implantation de systèmes d'alimentation à énergie solaire en diminuant le nombre de cellules photovoltaïques nécessaires pour fournir une même puissance. Il

existe différents algorithmes pour maximiser la puissance en temps réel. La méthode de perturbation et d'observation [3] est certainement la plus connue. Cette méthode introduit une perturbation temporelle dans le système afin de déterminer le signe du gradient de la puissance par rapport à la tension ou à la résistance. La direction à suivre pour se rapprocher de l'optimum est ainsi identifiée. Bien qu'elle soit d'une grande simplicité, cette méthode converge lentement puisque le pas d'optimisation est fixe et seul le signe du gradient est utilisé pour déterminer la direction à suivre. La vitesse de convergence peut être améliorée en ajustant le pas d'optimisation proportionnellement à la valeur du gradient [4]. Dans ces deux types d'algorithmes, l'utilisation d'une perturbation temporelle nécessite un temps d'attente entre chaque ajustement de charge afin de permettre au système d'atteindre le régime permanent. Pour un système électrique le temps de réponse est très rapide. Par contre, le filtrage du bruit de mesures peut venir ralentir le système. La perturbation temporelle ralentit donc la convergence tout en amenant le système à osciller autour du point de convergence. La méthode de la tension constante [5] ne nécessite pas de perturbation temporelle. Cette méthode est donc plus rapide que la méthode classique de perturbation et d'observation et n'introduit pas d'oscillation autour du point de convergence. Toutefois, l'évaluation de la tension optimale à suivre est intimement reliée à la valeur d'une constante qui n'est pas connue précisément. De plus, cette méthode requiert l'interruption momentanée du circuit.

La méthode d'optimisation multi-unités [6] est une méthode d'optimisation en temps réel s'appliquant à des procédés contenant plusieurs unités identiques ou semblables. Les unités sont opérées à des valeurs différentes. Cette différence entre les entrées des unités est constante tout au long de l'évolution du système vers son point optimal. Le gradient est estimé par différences finies entre les sorties des unités. Dans cet article, la méthode d'optimisation multi-unités est appliquée à un système à énergie solaire et est comparée à la méthode de perturbation et d'observation. Les résultats obtenus démontrent les principaux avantages de la méthode d'optimisation multi-unités face à la méthode de perturbation et d'observation : une plus

grande vitesse de convergence et une meilleure précision quant au point de convergence de la méthode.

Le papier est organisé comme suit. La section II présente la définition du problème d'optimisation. La section III trace une revue de différents algorithmes MPPT. L'algorithme d'optimisation multi-unités est présenté à la section IV alors que les résultats expérimentaux sont présentés et discutés à la section V. Finalement, la section VI est réservée à la conclusion.

II. DÉFINITION DU PROBLÈME

Le problème de maximisation de puissance adressé par les algorithmes d'optimisation MPPT est un problème d'optimisation statique. Le problème de maximisation de la puissance dissipée par la source photovoltaïque dans la charge que les algorithmes MPPT tenteront de résoudre s'exprime comme suit :

$$\max_V P = VI \quad (1)$$

Où P est la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque, I , le courant fourni par la cellule et V , la tension à ses bornes. Ainsi, la tension sera ajustée afin de maximiser la puissance fournie par la cellule.

La cellule photovoltaïque peut être modélisée par la jonction PN d'une diode classique Fig. 1.

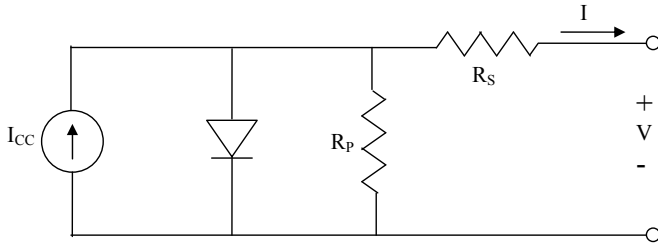


Fig. 1. Modélisation d'une source photovoltaïque

L'expression du courant d'un tel circuit est donnée par :

$$I = I_{CC} - I_{SAT} \left[e^{\frac{V+IR_S}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2)$$

Où I_{CC} représente le courant de court-circuit de la cellule, I_{SAT} , le courant de saturation, R_S , la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et des connexions, n , le facteur de non idéalité de la jonction, V_T , le potentiel thermodynamique et R_P , la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

La résistance interne R_{int} de la cellule photovoltaïque s'exprime en dérivant (2) par rapport au courant I et en isolant l'expression $\frac{dV}{dI}$:

$$R_{int} = -\frac{dV}{dI} = \frac{R_{diode} R_P}{R_{diode} + R_P} + R_S \quad (3)$$

Où :

$$R_{diode} = \frac{I_{sat}}{nV_T} e^{\frac{V+IR_S}{nV_T}} \quad (4)$$

Le point maximal de puissance délivrée dans une charge est atteint lorsque la valeur de cette charge est équivalente à la valeur de la résistance interne de la source. La résistance

interne d'une cellule photovoltaïque est fonction du courant de saturation I_{sat} , de la tension V , du courant I et du potentiel thermodynamique V_T (3,4) ce qui justifie l'utilisation d'un algorithme de suivi du point maximal de puissance en temps réel.

Habituellement, les algorithmes de suivi du point maximal de puissance utilisent la tension ou le courant comme variable manipulée. L'approche privilégiée dans le présent article pour la comparaison des algorithmes utilise plutôt la résistance comme variable manipulée :

$$\max_R P = VI = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

où R est la valeur de résistance du potentiomètre branché à une cellule photovoltaïque (Fig. 2). La seule mesure disponible est la lecture de tension prise aux bornes de ce potentiomètre et la valeur de R est supposée connue en tout temps. Si ce n'est pas le cas, une résistance étalon de faible valeur par rapport à la valeur optimale de R peut être utilisée en série avec le potentiomètre. Une lecture de tension supplémentaire aux bornes de cette résistance étalon permet le calcul de la valeur de R .

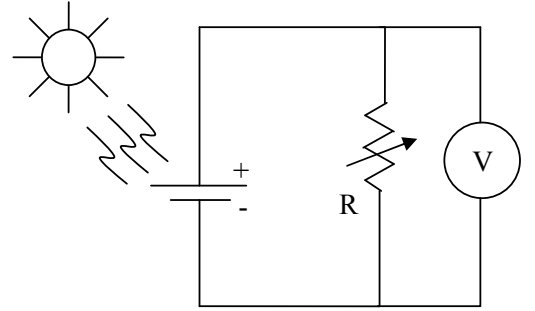


Fig. 2. Circuit alimenté par une cellule photovoltaïque

La vitesse de convergence vers la puissance maximale est le point de comparaison des différents algorithmes présentés dans la prochaine section. Bien que les systèmes électriques répondent très rapidement, le filtrage nécessité par la présence de mesures bruitées peut ralentir le temps de convergence de tels systèmes et le gain en vitesse découlant du choix d'une méthode d'optimisation appropriée est quantifiable.

III. ALGORITHMES MPPT

A. Méthode de perturbation et d'observation

La méthode de perturbation et d'observation [3] est sûrement la méthode la plus instinctive pour rechercher le point maximal de puissance. Le signe du gradient de la puissance par rapport à la tension est estimé à partir de deux points d'opération différents pour deux instants donnés. À partir des lectures de tension aux bornes de la résistance correspondant à ces deux points d'opération, la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque est calculée. Les valeurs de puissance obtenues sont alors comparées afin de déterminer le signe du gradient. Le point de consigne de

la tension V_{ref} est ajustée d'un pas constant ΔV dans la même direction que le gradient :

$$V_{ref}(k+2) = \begin{cases} V_{ref}(k+1) + \Delta V & si \frac{P(k+1)-P(k)}{V_{ref}(k+1)-V_{ref}(k)} \geq 0 \\ V_{ref}(k+1) - \Delta V & si \frac{P(k+1)-P(k)}{V_{ref}(k+1)-V_{ref}(k)} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Dans le cas d'un problème où la variable manipulée est la valeur de la résistance variable (Fig. 2), la loi de commande devient :

$$R(k+2) = \begin{cases} R(k+1) + \Delta R & si \frac{P(k+1)-P(k)}{R(k+1)-R(k)} \geq 0 \\ R(k+1) - \Delta R & si \frac{P(k+1)-P(k)}{R(k+1)-R(k)} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Cette méthode est dite d'ordre 0 puisque seul le signe du gradient est utilisé dans la loi de commande. Le pas d'optimisation ΔR est constant, il en résulte une convergence relativement lente notamment lorsque le point initial est loin du point optimal. La présence d'une perturbation persistente ΔR amène le système à osciller autour de ce point optimal.

B. Méthode du gradient

Au point maximal de puissance, le gradient de la puissance par rapport à la tension est nul [4] :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dP}{VdV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (9)$$

L'expression $\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$ peut être utilisée comme estimation du gradient où le gradient de la conductance $\frac{dI}{dV}$ est évalué par différences finies :

$$\frac{dI}{dV}(k+1) \simeq \frac{I(k+1) - I(k)}{V(k+1) - V(k)} \quad (10)$$

Ce qui mène à :

$$V_{ref}(k+1) = V_{ref}(k) + \Delta V \quad (11)$$

$$V_{ref}(k+2) = V_{ref}(k+1) + \alpha \frac{dP}{VdV} \quad (12)$$

Pour un circuit tel que celui de la Fig. 2, le gradient de la puissance par rapport à la résistance peut être utilisé :

$$R(k+1) = R(k) + \Delta R \quad (13)$$

$$\begin{aligned} R(k+2) &= R(k+1) + \alpha \frac{\partial P}{\partial R} \\ &= R(k+1) + \alpha \frac{P(k+1) - P(k)}{R(k+1) - R(k)} \end{aligned} \quad (14)$$

Bien que cette méthode est une méthode d'ordre 1 (puisque la valeur du gradient est utilisée directement dans

la loi de commande), la présence d'une perturbation temporelle ΔR impose un temps d'attente permettant au système de se stabiliser et introduit des oscillations autour du point de convergence.

C. Méthode de la tension constante

Le principe de la méthode de la tension constante réside dans l'observation du ratio entre la tension correspondant à la puissance maximale et celle de la tension mesurée en circuit ouvert [5]. Ce ratio est relativement constant :

$$\frac{V^*}{V_{co}} \simeq K < 1 \quad (15)$$

La tension en circuit ouvert est mesurée en isolant temporairement la cellule photovoltaïque. Le point d'opération optimal est alors calculé par (11) avec une valeur de K préalablement fixée :

$$V_{ref}(k+1) = V^* \quad (16)$$

Cette procédure est répétée périodiquement pour atteindre la position du point de puissance maximal. Bien que cette méthode soit extrêmement simple, il est difficile de choisir la valeur optimale de la constante K. La littérature rapporte un bon taux de succès pour des valeurs de K qui s'étendent de 73 à 80 %.[7], [8], [9]

Pour un circuit tel que celui de la Fig. 2, la loi de commande devient :

$$R(k+1) = R(k) + \alpha(V^* - V(k)) \quad (17)$$

Cette méthode est également une méthode d'ordre 1. L'absence de perturbation temporelle amène une plus grande rapidité de convergence et moins d'oscillation autour du point de convergence. Toutefois, la méthode de tension constante possède une efficacité relativement faible principalement en raison de l'erreur sur la valeur de K. De plus, la mesure de la tension en circuit ouvert requiert une interruption momentanée de la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque ce qui n'est pas toujours souhaitable. Il serait possible d'ajuster dynamiquement la valeur de K mais ceci ralentirait la vitesse de convergence de cet algorithme.

IV. OPTIMISATION MULTI-UNITÉS

La méthode d'optimisation multi-unités récemment proposée [6] peut être appliquée pour le suivi de la puissance optimale dans les systèmes de cellules photovoltaïques. Cette méthode requiert la présence d'unités identiques qui sont opérées à des entrées de valeurs légèrement différentes. Le gradient est ensuite estimé par différences finies entre les sorties des unités. Dans le cas des cellules photovoltaïques, un circuit tel que celui présenté à la Fig. 2 représente une unité où la valeur de la résistance est l'entrée du système et la puissance dissipée dans chacune des résistances représente la sortie à optimiser.

Lorsque les unités ne sont pas parfaitement identiques, l'introduction de correcteurs adaptatifs dans le schéma est nécessaire pour rendre les deux unités le plus identiques possibles [10]. Dans l'application présentée dans cet article,

un correcteur de valeur constante (sans adaptation) est utilisé.

Contrairement aux méthodes de perturbation et d'observation et de gradient, la perturbation n'est pas temporelle mais plutôt dans la dimension des unités du système. Tout comme dans le cas de la méthode de tension constante il en résulte une convergence vers l'extremum beaucoup plus rapide qu'avec les méthodes où le gradient est extrait par filtrage temporel. Toutefois, cette méthode requiert la présence de $m + 1$ unités semblables où m est le nombre d'entrées dans le système à optimiser.

La nécessité d'avoir plusieurs unités semblables ne représente pas une grande restriction dans le cadre des circuits alimentés par énergie solaire. Dans ce type de systèmes, il est courant de rencontrer plusieurs unités branchées en parallèle ou en série afin de satisfaire la demande en électricité. Ces unités peuvent être branchées de façon à ce que la méthode d'optimisation multi-unités soit applicable.

Pour le problème énoncé en (5) qui comporte une seule variable d'entrée, R , la méthode requiert la présence de 2 circuits semblables. Le premier circuit est choisi comme unité de référence et est opéré à une valeur d'entrée R_1 . L'autre circuit est opéré à $R_2(k) = R_1(k) + \Delta R$. Le gradient est alors estimé par différences finies :

$$\hat{g} = \frac{P_2(k) - P_1(k)}{R_2(k) - R_1(k)} = \frac{\frac{V_2^2(k)}{R_2(k)} - \frac{V_1^2(k)}{R_1(k)}}{\Delta R} \quad (18)$$

Ainsi, la loi de commande extrême se écrit comme suit :

$$R_1(k+1) = R_1(k) + \alpha \frac{\frac{V_2^2(k)}{R_2(k)} - \frac{V_1^2(k)}{R_1(k)}}{\Delta R} \quad (19)$$

$$R_2(k+1) = R_2(k) + \alpha \frac{\frac{V_2^2(k)}{R_2(k)} - \frac{V_1^2(k)}{R_1(k)}}{\Delta R} \quad (20)$$

Les deux unités suivent la même loi de commande tout en conservant toujours une différence de ΔR entre elles. La Figure 3 représente le schéma d'un système d'optimisation multi-unités appliqué comme MPPPT pour des circuits alimentés par des cellules photovoltaïques.

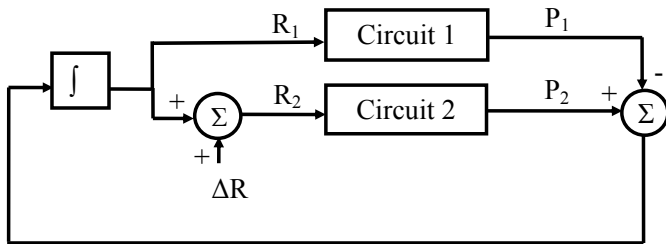


Fig. 3. Schéma de commande d'une boucle de recherche d'extremum par la méthode d'optimisation multi-unités

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les méthodes d'optimisation multi-unités et de perturbation et observation ont été appliquées à deux circuits alimentés par des cellules photovoltaïques (Solarbotics SCC2433B) afin d'optimiser la puissance délivrée par ces 2 cellules lorsque branchées à 2 potentiomètres digitaux (Analog Devices AD5220) tel qu'illustré à la Fig. 2. Le pas minimal pour l'ajustement de cette résistance est de 78 Ω . Afin de s'assurer de la valeur du potentiomètre en tout temps, une résistance étalon de 100 ohms a été insérée dans le circuit. La tension aux bornes de chacun des potentiomètres ainsi que la tension aux bornes de chaque source photovoltaïque a été mesurées. Ces lectures ainsi que le contrôle des potentiomètres digitaux ont été effectués le biais d'une carte d'acquisition de données et de commande multifonction avec branchement USB (Labjack U12). Les deux cellules photovoltaïques ont été éclairées avec la même source de lumière incandescente. Comme les mesures de tension étaient bruitées elles ont été filtrées par une moyenne sur 10 points lus à chaque 50 ms. Cette lecture moyennée a ensuite été utilisée dans l'application des méthodes d'optimisation.

Dans un premier temps, les courbes statiques de la puissance en fonction de la résistance ont été obtenues par une variation à chaque seconde de la résistance de 20 ohms à 8990 ohms par pas de 78 ohms (Fig. 4).

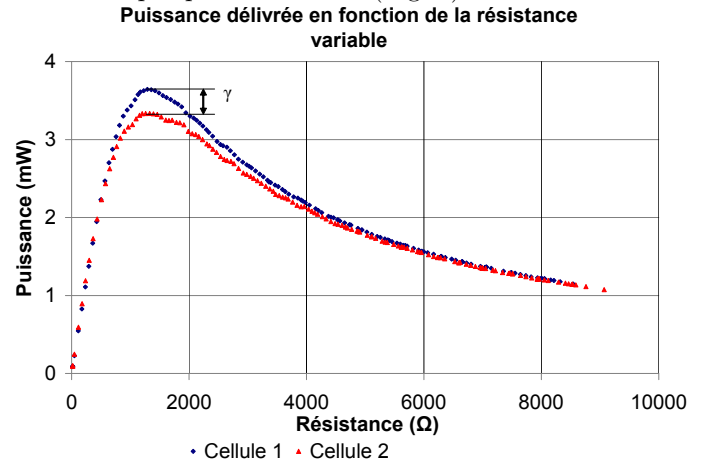


Fig. 4. Courbes statiques de la puissance délivrée en fonction de la résistance

Bien que les deux points d'opération optimaux en terme de résistances ($R_1^* = R_2^* \simeq 1250$ ohms) soient identiques, les puissances correspondantes sont légèrement différentes ($P_1^* \simeq 3.6$ et $P_2^* \simeq 3.3$ mW). L'introduction d'un correcteur $\gamma = P_2^* - P_1^*$ dans le calcul du gradient pour la méthode d'optimisation multi-unités permet de corriger cet écart :

$$\hat{g} = \frac{P_2 - P_1 - \gamma}{\Delta R} \quad (21)$$

La présence de γ permet d'éliminer la différence entre les deux points maximaux de puissance des unités sans toutefois éliminer la différence de courbure des caractéristiques statiques. Cette différence de courbure n'influence pas la convergence de la méthode d'optimisation multi-unités mais une mauvaise estimation de γ modifie le point de convergence. Il est possible d'adapter la méthode d'optimisation multi-unités afin de permettre l'estimation en temps

réel de γ [10]. Cette adaptation évite le calcul de la valeur de γ à partir des caractéristiques statiques (Fig. 4) obtenues par la variation de la résistance pour toute la plage d'opération.

La Figure 5 démontre le comportement des 2 circuits résultant de l'application de la méthode de perturbation et d'observation en utilisant une valeur de ΔR de 78 Ω pour une valeur initiale de la résistance R_{init} , de 468 ohms et un intervalle de 2 secondes entre chaque pas d'optimisation. L'archivage des données est effectuée à chaque seconde.

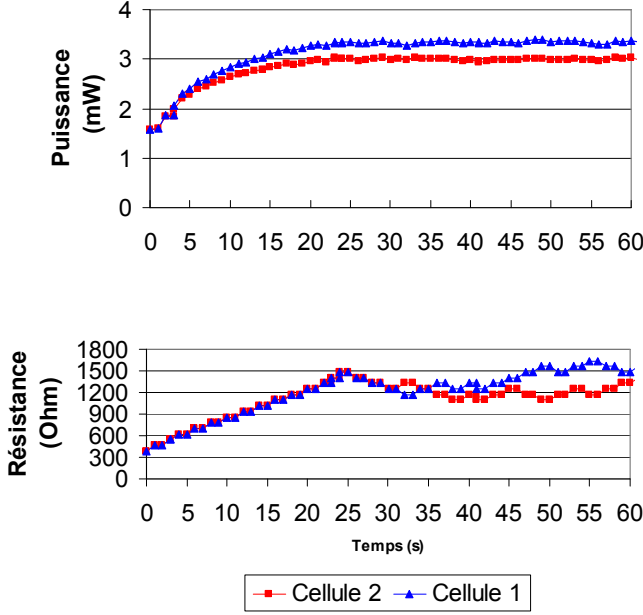


Fig. 5. Résultat de la méthode perturbation et observation pour un ΔR de 78 Ω

Les deux circuits convergent autour de l'optimum en 25 secondes. Le circuit 1 converge vers une valeur de résistance moyenne de 1465 Ω alors que le circuit 2 se stabilise autour d'une valeur moyenne de 1265 Ω . Toutefois, on peut observer une oscillation autour de ces valeurs de l'ordre de 100 Ω d'amplitude.

Dans les mêmes conditions, avec un gain α ajusté à 1150 $\frac{\Omega^2}{mW}$, la méthode d'optimisation multi-unités amène le système à converger autour de 1170 Ω pour le circuit 1 et de 1248 Ω pour le circuit 2. Ces valeurs sont atteintes en 4 secondes (Fig. 6).

La méthode d'optimisation multi-unités converge donc plus de 6 fois plus rapidement que la méthode de perturbation et d'observation pour un ΔR de 78 Ω . Pour diminuer le temps de convergence de la méthode de perturbation et d'observation, il faudrait faire des pas plus grands i.e. augmenter la valeur de ΔR . Le tableau I contient les résultats obtenus pour différentes valeurs de ΔR . On observe effectivement une réduction du temps de convergence lorsque la valeur de ΔR est plus grande. Toutefois ce gain en vitesse se fait au détriment de la précision de convergence autour de l'optimum réel : on observe un plus grand écart-type, donc plus d'oscillations autour du point optimal tant au niveau du point d'opération de la résistance qu'au niveau de la puissance délivrée.

Les mêmes essais ont été faits avec la méthode d'optimisation multi-unités (II).

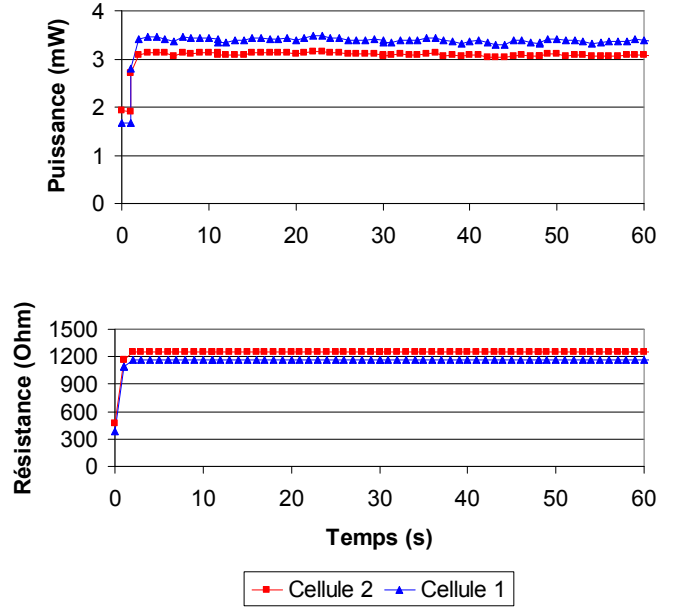


Fig. 6. Résultat de la méthode d'optimisation multi-unités pour un ΔR de 136 Ω

TABLEAU I
RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE PERTURBATION ET OBSERVATION

$\Delta R(\Omega)$	t(s)	Circuit	$\bar{R}(\Omega)$	$\sigma_R(\Omega)$	P (mW)
78	25	1	1465	120	3.35 ± 0.029
		2	1265	110	3.00 ± 0.022
156	12	1	1360	170	3.58 ± 0.040
		2	1545	225	3.03 ± 0.042
312	6	1	1370	340	3.14 ± 0.251
		2	1500	330	2.88 ± 0.106

Les résultats du tableau II démontrent que le changement de la valeur de ΔR a très peu d'impact sur la vitesse de convergence et sur l'oscillation autour de l'optimum, l'écart-type observé sur la puissance correspondant au bruit de mesure. Toutefois, le point de convergence de chaque unité sera à une distance $\frac{\Delta R}{2}$ de l'optimum réel. Plus la courbure de la puissance en fonction de la résistance dans le voisinage de l'optimum est accentuée, plus la perte de puissance engendrée par cette distance sera considérable. Elle le sera d'autant plus pour de grandes valeurs de ΔR .

En comparant les résultats obtenus par l'application des deux méthodes on remarque que les oscillations autour du point d'opération optimal avec la méthode de perturbation et d'observation sont beaucoup plus grandes. Ces oscillations proviennent de deux sources : le pas d'optimisation fixe et l'erreur sur le gradient résultant du bruit. Comme le filtrage n'est pas parfait, le bruit de mesure résiduel sur la puissance engendre une erreur dans l'estimation du gradient. En effet, même si l'erreur sur le gradient est de faible valeur, si elle occasionne un changement de signe du gradient, la méthode de perturbation et d'observation change la valeur de la résistance dans la mauvaise direction. Le filtrage est un compromis entre la précision et la vitesse de convergence : l'augmentation du nombre de points utilisés pour la moyenne diminue le nombre de mauvais pas mais

TABLEAU II
RÉSULTATS DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION MULTI-UNITÉS

$\Delta R(\Omega)$	t(s)	Circuit	$\bar{R}(\Omega)$	P (mW)
78	4	1	1170	3.37 ± 0.040
		2	1248	3.08 ± 0.028
156	4	1	1170	3.27 ± 0.030
		2	1326	2.98 ± 0.025
312	5	1	1132	3.41 ± 0.025
		2	1404	3.11 ± 0.017

augmente le temps d'attente entre chaque pas.

Dans le cas de la méthode d'optimisation multi-unités, l'ajustement adéquat du gain α permet d'éviter les pas engendrés par le bruit de mesure : si le produit du gain et de l'erreur d'estimation du gradient est inférieure au pas minimal de la résistance digitale, aucun changement n'est apporté à la résistance.

Le choix de ΔR pour la méthode d'optimisation multi-unités ne fait qu'influencer la précision du point de convergence dans le présent cas. Cette condition n'est vraie que pour le cas où les valeurs optimales des résistances sont identiques. Sinon, la valeur et le signe de ΔR doivent être choisis en fonction de la différence entre ces 2 valeurs optimales afin d'assurer la stabilité de la méthode [10].

VI. CONCLUSION

Dans cet article, la méthode d'optimisation multi-unités est appliquée en vue de maximiser la puissance délivrée par deux cellules photovoltaïques, les charges utilisées étant deux potentiomètres digitaux. La performance de cette méthode est comparée à celle obtenue par la méthode de perturbation et d'observation lorsqu'appliquée aux mêmes systèmes. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la performance de la méthode d'optimisation multi-unités est supérieure à celle de la méthode de perturbation et d'observation notamment en terme de vitesse de convergence et de précision. La vitesse de convergence de la méthode de perturbation et d'observation peut être améliorée par l'accroissement du pas d'optimisation. Toutefois, un tel changement de pas amène une dégradation de la précision. L'avantage principal de la méthode d'optimisation multi-unités est sa rapidité de convergence. Pour des systèmes très rapides comme les circuits alimentés par énergie solaire, cet avantage peut ne pas s'avérer nécessaire. Toutefois, dans des systèmes plus lents tels que les piles à combustibles microbiennes, cet avantage représente un gain en temps de convergence de l'ordre de plusieurs heures [11].

RÉFÉRENCES

- [1] J.R. Olivier, T.M. Harms, et D.J. Esterhuyse. Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at south africa's sanae iv base in antarctica. *Renewable Energy*, 33(5) :1073–1084, 2008.
- [2] C. Sungur. Sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels. *International journal of green energy*, 4(6) :635–643, 2007.
- [3] C. Hua et C. Shen. Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage systems. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Proceedings*, 2 :679–683, 1998.
- [4] K.H. Hussein et I. Muta. Maximum photovoltaic power tracking : An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE – Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution*, 142(1) :59–64, 1995.
- [5] M.A.S. Masoum, H. Dehbonei, et F. Fuchs. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage- and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 17(4) :514–522, 2002.
- [6] B. Srinivasan. Real-time optimization of dynamic systems using multiple units. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 17 :1183–1193, 2007.
- [7] M. Andersen et B. Alvsten. 200w low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems. *IECON : Proceedings of the 1995 IEEE 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1(1) :572–577, 1995.
- [8] L. Van der Merwe et G. Van der Merwe. Maximum power point tracking -implementation strategies. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1(1) :214–217, 1998.
- [9] M. Abou El Ela et J. Roger. Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system. *Solar Cells : Their Science, Technology, Applications and Economics*, 13(2) :185–195, 1984.
- [10] L. Woodward, M. Perrier, et B. Srinivasan. Correction for non-identical units in multi-unit optimization. accepté, IFAC 2008, 2008.
- [11] L. Woodward, B. Tartakovsky, M. Perrier, et B. Srinivasan. Maximizing power production in a stack of microbial fuel cells using multi-unit optimization method. *Biotechnology Progress*, soumis, 2008.