

## ETUDE DE LISSAGE DES INTERMITTENCES DE PUISSANCE PHOTOVOLTAÏQUE PAR BATTERIE DE STOCKAGE : CAS CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE 20MWc AMBATOLAMPY MADAGASCAR

R. H. RANDRIAMBOAVONJY<sup>1</sup> et S.H. RAKOTONIAINA<sup>2</sup>

1- Doctorant, Equipe d'Accueil Doctorale Génie électrique, Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

2- Maître de conférences, Responsable de laboratoire de Recherche de l'Equipe d'Accueil Doctorale Génie électrique. Ecole Doctorale Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Auteur correspondant : R. H. RANDRIAMBOAVONJY

E-mail : [randrirajo@gmail.com](mailto:randrirajo@gmail.com)

Téléphone : +261 34 36 350 31

### Résumé

La situation énergétique à Madagascar se trouve dans une situation difficile. La libéralisation du secteur électricité favorise les Productions Décentralisées d'Electricité. Madagascar présente un gisement solaire important. La source d'énergie solaire n'aggrave pas le changement climatique, elle est une source d'énergie sans carbone. Cependant malgré ses avantages, l'énergie solaire présente un flux d'énergie variable et imprévisible.

Notre travail consiste à étudier les performances d'un algorithme de lissage par moyenne mobile pour atténuer les fluctuations dues à l'intermittence de la source solaire. Un convertisseur élévateur de tension sera contrôlé par un algorithme de suivi du Point de Puissance Maximale basé sur Perturbation et Observation et un convertisseur abaisseur-élévateur réversible en courant sera contrôlé par un algorithme de lissage pour gérer la décharge et la charge du système de stockage par des batteries. Pour illustrer notre démarche nous avons pris comme exemple la centrale solaire photovoltaïque 20 MWc d'Ambatolampy. Les résultats obtenus montrent que le lissage de l'irradiation solaire, par un système de stockage d'énergie, peut réduire la volatilité de la production d'électricité à court terme dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

**Mots clés :** solaire photovoltaïque, convertisseur-élévateur, lissage de puissance, convertisseur abaisseur-élévateur, stockage d'énergie.

## 1- Introduction

Selon l'ONU, le secteur énergie est la source de 66% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. On estime que 3 milliards de la population mondiale dépendent encore du bois de feu pour la cuisson [1]. A Madagascar, 15 millions de la population n'ont pas accès à l'électricité, le taux d'électrifications de la population est encore très faible 15% dont 58% en milieu urbain et 7% en milieu rural [1]. La compagnie nationale d'électricité et de l'eau (JIRAMA) n'arrive pas à satisfaire la demande en électricité toujours croissante. Les bailleurs de fonds conseillent la libéralisation du secteur énergie. Ainsi, le Ministère de l'Énergie a mis en œuvre des réformes, depuis 1999, par la loi n°98-032 portant sur la libéralisation du secteur électricité, ensuite par la loi n° 2017 – 020 portant sur le Code de l'Electricité. Les Productions Décentralisées d'Electricité par la source solaire deviennent de plus en plus forte et massive. La source solaire est une source d'énergie sans carbone, diminue la dépendance aux carburants fossiles et surpasse les contraintes liées à l'éloignement des réseaux électriques de distribution. Malgré cela, l'énergie solaire est une source d'énergie intermittente, la puissance produite au fil du temps est fluctuante à cause de la variation des paramètres météorologiques. Pour les centrales photovoltaïques connectées aux réseaux électriques publics, les fluctuations de l'irradiation solaire en amont des convertisseurs diminuent la qualité de l'énergie électrique : les taux des harmoniques, les fluctuations de la tension, les variations de fréquence. Nous allons citer quelques articles sur le lissage de l'irradiations solaire par les batteries de stockage.

**Deepshikha Yadav et al.** ont effectué l'étude d'un système photovoltaïque connecter au réseau électrique avec un système de stockage par batterie (Lithium ion) pour compenser les fluctuations de puissance avec la méthode de moyenne glissante ou moyenne mobile (MA : Moving Average) [2]. **Samson G. Tesfahunegn et al.** ont utilisé la méthode de lissage exponentiel (EMA) pour supprimer les fluctuations de puissance à court terme dans la production du système photovoltaïque avec Stockage d'hydrogène [3]. **MISWAR A. SYED et al.** ont proposé la Régression mobile filtre (Moving Regression (MR)) combinée avec l'état de charge (State Of Charge (SOC)) pour contrôler la variabilité de la production solaire photovoltaïque [4]. **Luis Gerardo González et al.** ont proposé un algorithme de rampe, qui a été utilisé pour contrôler les fluctuations de la puissance de sortie dans un système photovoltaïque au point de couplage commun (PCC), avec l'intégration de systèmes de stockage d'énergie [5].

Dans les littératures, de nombreux travaux ont été faits sur le lissage de l'irradiation solaire par les différents algorithmes de commande des convertisseurs dans le système photovoltaïque.

Pour conclure, notre travail consiste à vérifier le lissage de la puissance de l'irradiation solaire par la combinaison d'un convertisseur élévateur suivi par un algorithme de MPPT basé sur P&O avec un autre convertisseur élévateur-abaisseur en courant commandé par un algorithme de lissage moyenne mobile pour commander la charge et la décharge du système de stockage batterie électrochimique. L'ancienne centrale solaire 20MWc de Nea Madagascar sise à Ambatolampy sera exploitée pour illustrer cette méthode de lissage de l'irradiation solaire d'un système photovoltaïque connecté au réseau de transport interconnecté d'Antananarivo.

## 2- Méthodologie

La figure 3 présente le schéma du système étudié.

### Fonctionnement du système :

Le point maximum de puissance d'un système photovoltaïque varie proportionnellement en fonction de la température et de l'irradiation.

Les valeurs instantanées de la tension et du courant mesurées à la sortie du générateur photovoltaïque, sont captées en permanence par un algorithme MPPT afin de se rapprocher du point de puissance maximum. Le rapport cyclique du convertisseur DC-DC gère le contrôle et la commande vers le circuit de puissance pour charger la batterie.

Le hacheur abaisseur-élévateur réversible en courant est utilisé pour les systèmes à deux sens de transfert d'énergie. Il est considéré comme un étage d'adaptation, et il permet également de réaliser les opérations de charge et de décharge vue de sa réversibilité en courant. Ainsi, il est élévateur de tension pour la décharge et abaisseur de tension pour la charge. Puis il contrôle aussi la tension du bus DC en chargeant / déchargeant le stockage d'énergie pendant les fluctuations de puissance.

### Algorithme Perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est l'une des approches les plus utilisées pour faire une recherche du point maximal de puissance MPPT. Elle exige seulement des mesures de tension et de courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ .

### Algorithme Moyenne mobile :

La puissance photovoltaïque réelle et la taille de la fenêtre sont les seules entrées de l'algorithme. L'algorithme de moyenne mobile calcule une valeur de puissance de référence en faisant la moyenne d'une donnée de puissance enregistrée pendant une certaine période.

L'état de charge ou décharge de la batterie dépend de la différence entre les données de la puissance réelle de sortie du système photovoltaïque et la puissance après application de l'algorithme de lissage. Le degré de lissage peut être ajusté en modifiant la valeur de la taille de la fenêtre. Une grande taille de fenêtre conduira à une meilleure puissance disponible et lisse, elle peut créer un retard ou un mauvais suivi aussi.

L'algorithme de la moyenne mobile est donné comme suit :

$$P_{ref}(t) = \frac{\sum_{i=0}^{w-1} P_{pv}(t-i)}{w} \quad (1)$$

$$P_{batt}(t) = P_{ref}(t) - P_{pv}(t) \quad (2)$$

Avec :

$i$  : représente le rang

$P_{pv}$  : La puissance photovoltaïque réelle ;

$w$  : la taille de la fenêtre ;

La stratégie de gestion de l'énergie consistera à envoyer une instruction au convertisseur abaisseur-élevateur à chaque période de temps «  $i$  » pour commander la batterie. Lorsque le  $P_{batt} > 0$  signifie que la batterie est en mode de décharge et lorsque le  $P_{batt} < 0$  signifie que la puissance est injectée dans le système de stockage et la batterie en mode de charge.

$$P_{lissé}(t) = P_{batt}(t) + P_{pv}(t) \quad (3)$$

La simulation du système étudié se trouve sur la figure 4.

Selon les caractéristiques de l'onduleur multi-strings INGECON SUN 1165TL U B420 dans la centrale Nea Madagascar à Ambatolampy, nous avons simulé un système sur un seul onduleur avec les panneaux qui lui convient [11]. En effet, il existe plusieurs onduleurs connectés en parallèle sur ce site. Par conséquent, pour illustrer notre approche, le système est composé de 15 strings de 20 modules, étant donné que c'est le nombre de modules maximum supporté par un seul onduleur.

La figure 5 présente les caractéristiques du module photovoltaïque utilisé.

Nous avons utilisé l'irradiation solaire du 21 février 2023 de Nea Madagascar. (Figure 6).

### 3- Résultats

Il existe deux types d'architecture des systèmes photovoltaïques connectés au réseau public :

- Système photovoltaïque sans stockage ; (Figure 1)
- Système photovoltaïque avec stockage. (Figure 2)

La figure 1 illustre le fonctionnement de l'ancienne centrale solaire photovoltaïque de Nea Madagascar sise à Ambatolampy de puissance 20MWc connectée au réseau électrique Interconnecté d'Antananarivo (RIA) par une tension 63kV avec un transformateur régulateur en charge qui fait le réglage de la tension. Et la figure 2, couplage en alternatif illustre aussi la nouvelle centrale solaire de Nea Madagascar sur le même site à Ambatolampy de puissance 20MWc avec un système de stockage.

D'après la figure 7, après application de la combinaison des algorithmes de suivi MPPT et moyenne mobile sur la courbe de puissance de l'irradiation (courbe en rouge), les pics de puissance sont réduits. Par exemple, la puissance de sortie du convertisseur est de 82kW, après lissage il est réduit à 70kW.

Sur la figure 8, on voit la différence entre la puissance non lissée et la puissance lissée pour donner la puissance de charge et de décharge de la Batterie.

Sur la figure 9 nous avons un pic de puissance maximale de charge et de décharge de la batterie de 25kW.

Actuellement, la loi n° 2017 – 020 portant sur le Code de l'Electricité ne définit pas clairement la puissance de raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau électrique public à Madagascar. Nous proposons les classifications des puissances suivantes :

- Toute installation dont la puissance installée dépasse 10 MW doit être raccordée sur le réseau de transport. (Tableau 1)
- Toute installation dont la puissance installée est inférieure ou égale à 10 MW doit être raccordée sur le réseau de distribution. (Tableau 2)

#### 4- Discussion

Les résultats obtenus sont issus de l'application de l'algorithme moyenne mobile pour le lissage du rayonnement solaire. Ce travail nous a permis de bien visualiser et d'analyser que la batterie va être stressée lors des courtes durées de charge et de décharge. D'après les résultats de **Luis Gerardo González *et al***, on peut exploiter l'algorithme de rampe pour améliorer atténuation des fluctuations de la puissance de sortie du rayonnement solaire. Leur méthode présente moins de stress pour la batterie de stockage car il y a une limite de taux de rampe maximum à respecter. Nous pouvons noter que l'intégration de l'accumulateur électrochimique avec le système d'énergie renouvelable intermittente est très important et elle joue un grand rôle important dans la réduction des pics et des creux de tension. Pour intégrer d'un système de stockage au réseau électrique, il est nécessaire de choisir un bon type de batterie pour chaque application.

#### 5- Conclusion

Les fluctuations de l'éclairement solaire, qui sont affectés par les conditions météorologiques, génèrent des perturbations en aval des systèmes photovoltaïques. Ces variations peuvent engendrer des perturbations de tension, de fréquences, des taux harmoniques et déséquilibre dans le réseau électrique. Pour réduire les impacts de ces problèmes, nous réalisons le lissage de la puissance du rayonnement solaire par la combinaison d'un convertisseur élévateur suivi par un algorithme de MPPT basé sur P&O avec un autre convertisseur élévateur-abaisseur en courant commandé par un algorithme de lissage moyenne mobile. La charge et la décharge du système de stockage batterie électrochimique est géré par l'algorithme moyenne mobile.

L'insertion du Système de Stockage d'Énergie (SSE) dans le système photovoltaïque connecté au réseau présente des avantages comme a été prouvé et démontré dans les résultats de simulation sous l'environnement Matlab Simulink : elle réduit les fluctuations de puissance, diminue le stress du parc batterie et augmente la pénétration de l'énergie solaire dans le réseau électrique. Pour illustrer notre démarche, nous avons exploité l'ancienne centrale solaire 20MWc de Nea Madagascar sise à Ambatolampy. Le pic de puissance diminue de 82 kW à 70 kW et la puissance du parc batterie nécessaire est 25 kW.

Dans cet article nous présentons également les critères de raccordement des systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux électriques à Madagascar. En perspective, nous contribuerons à l'étude de lissage du gisement solaire avec le gisement éolien pour améliorer le taux de pénétration des sources hybrides des énergies renouvelables dans les réseaux électriques interconnectés.

## 6- Remerciements

Nous remercions la société Nea Madagascar et le Département (Head of Studies and Development) de la compagnie nationale d'eau et d'électricité de Madagascar Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA), de nous avoir donné les informations nécessaires pour la réalisation de cet article.

## 7- Références bibliographiques

- [1] <https://groupe-filatex.com> « Quels sont les enjeux de la production d'électricité à Madagascar »
- [2] DeepshikhaYadav ,VijayaKumar, PankajRai. « Application of Moving Averages for PVpower smoothing using ».
- [3] Samson G. Tesfahunegn ,OysteinUlleberg, Preben J. S. Vie, Tore M. Undeland . « PVFluctuation Balancing Using Hydrogen Storage - a Smoothing Method for Integration of PVGeneration into the Utility Grid ».
- [4] Miswar a. Syed, Muhammad Khalid. « Moving Regression Filtering With Battery. State of Charge Feedback Control for Solar PV Firming and Ramp Rate Curtailment».
- [5] Luis Gerardo González, Rommel Chacon , Bernardo Delgado , Dario Benavides and JuanEspinoza « Study of Energy Compensation Techniques in Photovoltaic Solar Systems withthe Use of Supercapacitors in Low-Voltage Networks ».
- [6] Grid code malagasy/ code de réseau de transport.pdf
- [7] Grid code malagasy /code de réseau de distribution.pdf
- [8] M.P. Rakotondrainintsimba. Département (Head of Studies and Development) de la compagnie nationale d'eau et d'électricité de Madagascar (JIRAMA).pdf
- [9] [www.nerc.com](http://www.nerc.com) « Performance, Modeling, and Simulations of BPS-Connected Battery Energy Storage System and Hybrid Power Plants ».
- [10] Ionel Vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome ».
- [11] S.H. Rakotoniaina. « Rapport de visite de la centrale photovoltaïque 20 MWc Nea Madagascar ». Master 1 parcours Réseaux d'énergie et Energies Renouvelables. ESPA. juin 2022.

## 8- Tableaux

Tableau 3 : Tension de raccordement du système photovoltaïque plus de 10 MW au réseau électrique

Puissance maximale Producteur en Injection (MW)	Domaine de tension de raccordement (kV)
60	63
100	90
120	138
> 120	220

Source : [6]

Tableau 4: Tension de raccordement du système photovoltaïque inférieure ou égale à 10 MW au réseau électrique

Puissance de raccordement de l'Installation de Production (MW)	Domaine de tension de raccordement (kV)
5 à 10	Un=35
1 à 5	Un=20
0,013 à 1	Un=0,40
0,013	Un=0,23

Source : [7]

## 9- Figures

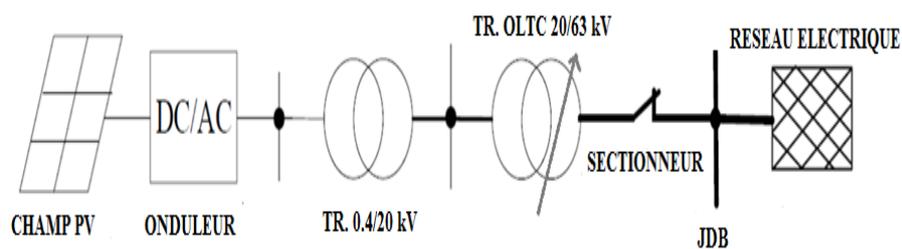


Figure 1: Schéma de fonctionnement de la centrale photovoltaïque d'Ambatolampy [8].

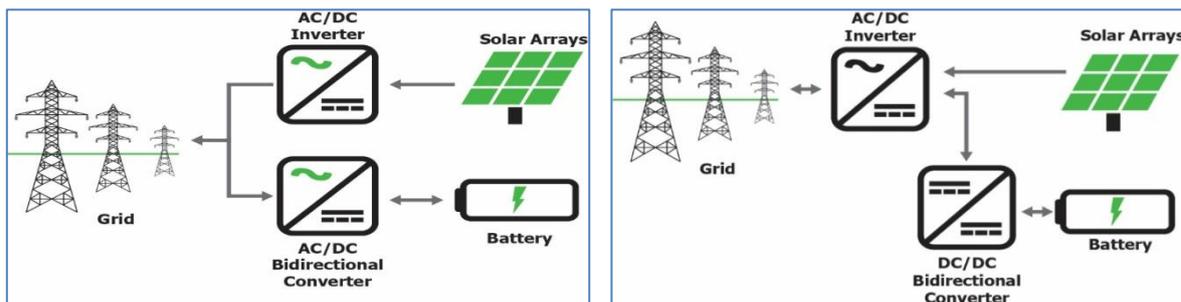


Figure 2 : Couplage en courant Alternatif et en courant continu [9]

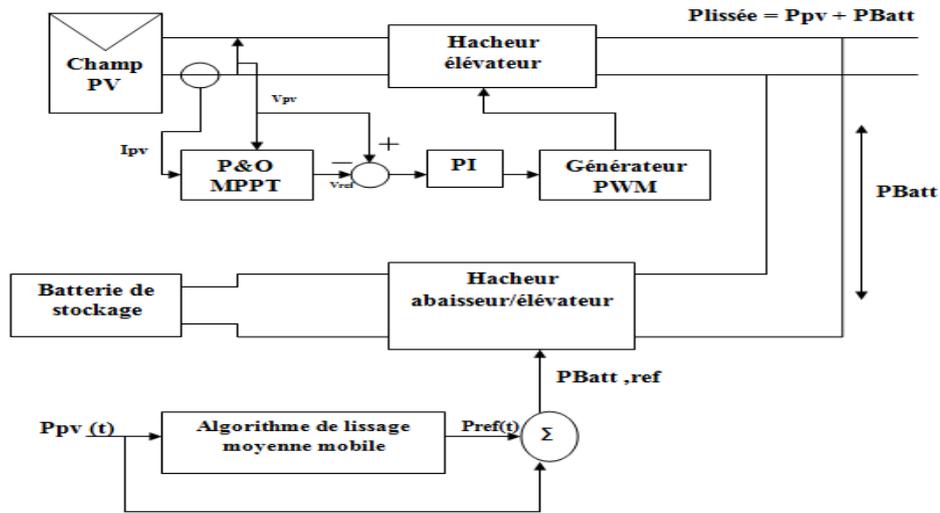


Figure 3 : Schéma du système étudié

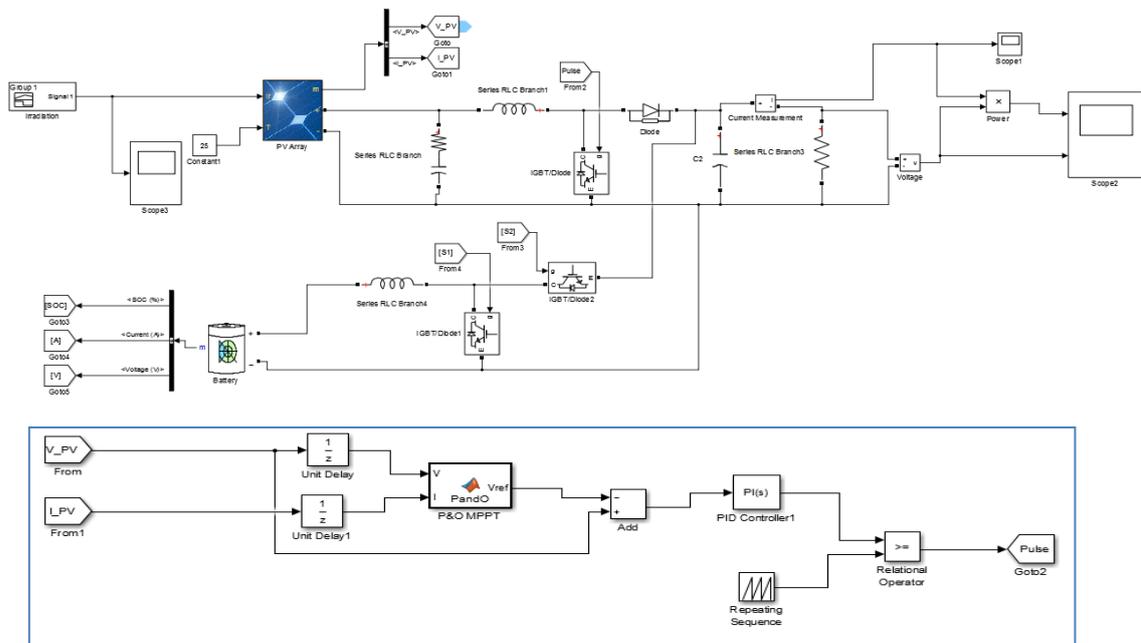


Figure 4 : Simulation du système étudié

Module: Jinko Solar JKM275P-72	
<input checked="" type="checkbox"/> Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected	
Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
275.154	72
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
45.4	8.19
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
36.3	7.58
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.3513	0.073199

Figure 5 : Caractéristiques du module photovoltaïque utilisé

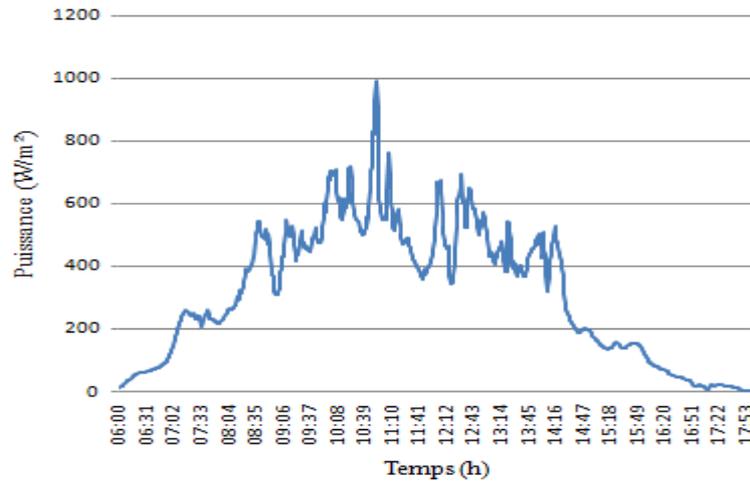


Figure 6 : Irradiation solaire d'Ambatolampy

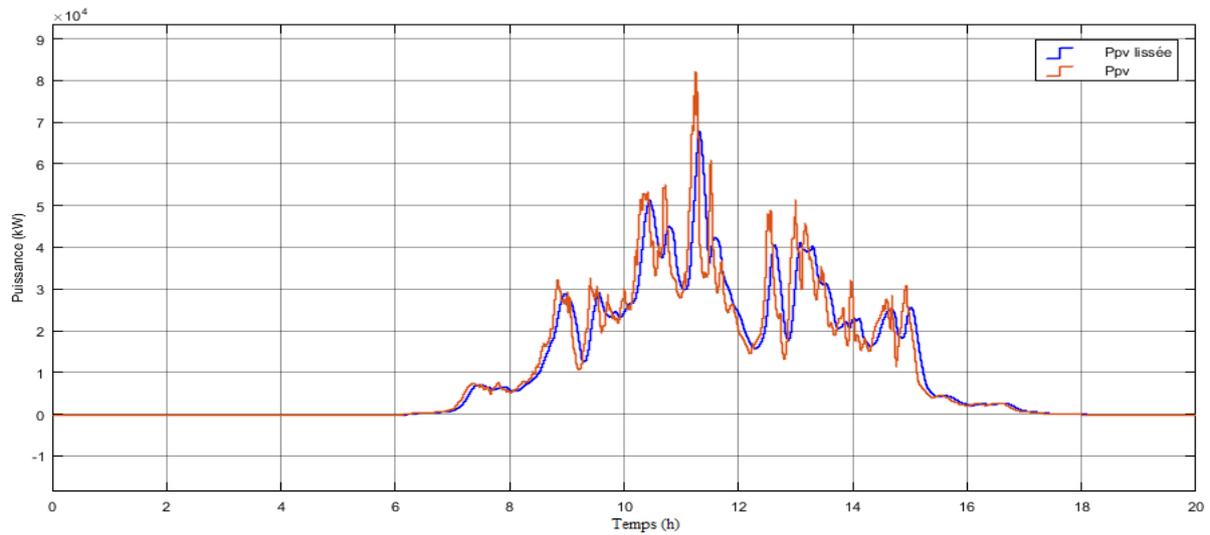


Figure 7 : Puissance lissée

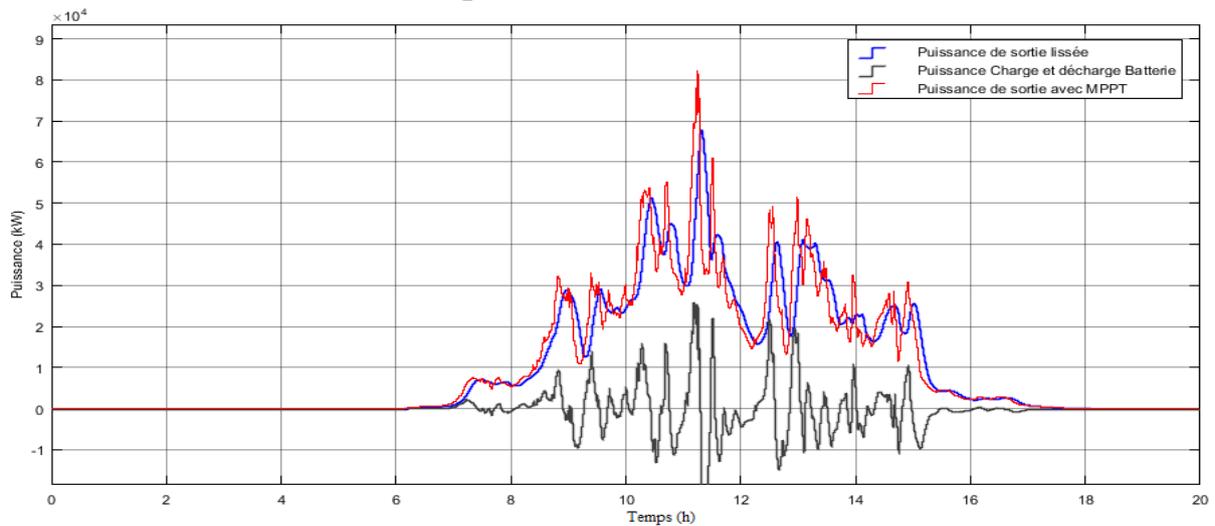


Figure 8 : Puissance non lissée (rouge), puissance lissée (bleu) et puissance de la batterie (noir)

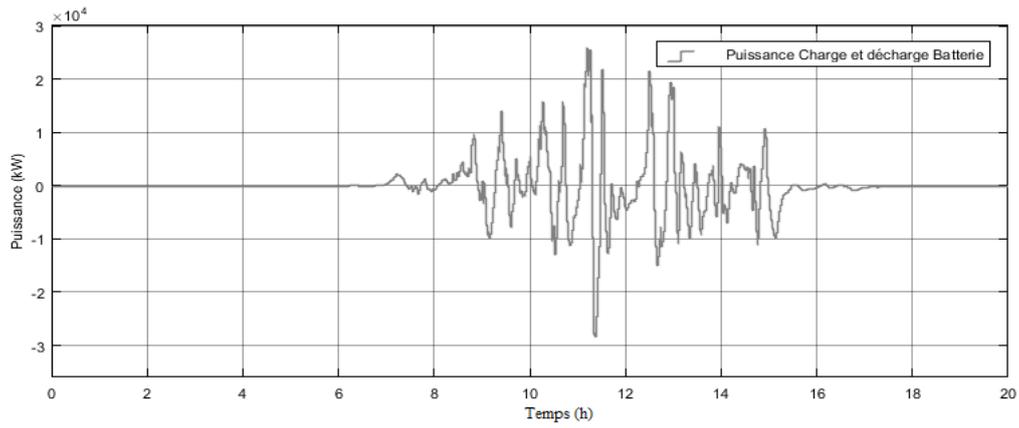


Figure 9 : Puissance Batterie