

## Étude d'un système hybride de production d'énergie

Bati Ernest BOYA BI<sup>1\*</sup>, Kamenan Blaise KOUA<sup>2</sup>, Prosper GBAHA<sup>1</sup>  
et Ekoun Paul Magloire KOFFI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, UMRI 58, Laboratoire d'Energies Nouvelles  
et Renouvelables, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Université Félix Houphouët Boigny, UFR SSMT, Laboratoire d'Energie Solaire,  
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

---

\* Correspondance, courriel : [batiplus2014@gmail.com](mailto:batiplus2014@gmail.com)

### Résumé

Cette étude se concentre sur le développement d'un modèle de dimensionnement optimal basé sur une approche itérative pour optimiser le dimensionnement des divers composants du système hybride photovoltaïque - stockage d'énergie via l'hydrogène - batteries (PV-SEH-Batteries) pour assurer une autonomie totale du système. Les relations entre les puissances des différents composants du système hybride ont été établies. La puissance du photovoltaïque et le volume de stockage de dihydrogène nécessaires pour répondre à la demande de l'utilisateur ont été définis. Une étude de sensibilité a été faite afin de déterminer les valeurs des coefficients  $K_{el}$  de l'électrolyseur et  $C_{nom}$  des batteries pour l'obtention de meilleurs résultats de simulation. Enfin, une architecture électrique et une stratégie de contrôle ont été mises en place pour une meilleure conversion et une gestion optimale de l'énergie au sein du système hybride de production d'énergie.

**Mots-clés :** *système hybride, photovoltaïque, stockage d'énergie, batteries, gestion d'énergie.*

### Abstract

#### Study of an hybrid system of energy production

This study focuses on development of optimal sizing model based on iterative approach to optimize sizing of various components of hybrid system Photovoltaic - Hydrogen energy storage - Batteries (PV-HES-Batteries) to ensure total autonomy of system. The relationships between the powers of various components of hybrid system have been established. The photovoltaic power and dihydrogen volume storage necessary to meet user demand have been defined. A sensitivity study was carried out to determine values of electrolyser coefficient  $K_{el}$  and batteries coefficient  $C_{nom}$  to obtain better simulation results. Finally, an electrical architecture and control strategy have been implemented for better conversion and optimal energy management within the hybrid system of energy production.

**Keywords :** *hybrid system, photovoltaic, energy storage, batteries, energy management.*

## 1. Introduction

L'épuisement rapide des ressources en combustibles fossiles à l'échelle mondiale, a nécessité une recherche urgente pour les sources d'énergie renouvelables. Parmi les nombreuses solutions de rechange, le photovoltaïque et l'énergie éolienne ont été considérés comme prometteuses pour répondre à la demande croissante pour l'énergie [1]. Les sources d'énergie éoliennes et photovoltaïques sont inépuisables, les processus de conversion sont sans pollution, et leur disponibilité est gratuite. Pour les systèmes à distance tels que les relais de télécommunication en plein désert, les stations terrestres de satellites, ou aux sites isolés qui sont loin d'un système d'énergie conventionnelle, les systèmes hybrides ont été considérés comme des sources alternatives attrayantes et privilégiées [2, 3]. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif [4 - 8]. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. Ainsi, plusieurs auteurs ont étudié les systèmes hybrides de production d'énergie afin de trouver la conception optimale. Ils ont introduit différentes formes d'optimisation pour trouver la bonne taille et réduire les coûts des systèmes hybrides [3, 4, 9 - 15]. Cependant, il n'y a pas assez d'informations sur le système hybride photovoltaïque - stockage d'énergie via hydrogène - batteries (PV-SEH-Batteries) de production d'énergie. L'objectif de notre étude est donc de dimensionner un système hybride photovoltaïque - stockage d'énergie via hydrogène - batteries (PV-SEH-Batteries) et de proposer une méthode de gestion optimale de l'énergie qu'il produit. Il s'agit de proposer une solution technologique qui permettra d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables pour la production d'énergie électrique.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Systèmes hybrides d'énergie

Les systèmes hybrides sont les technologies émergentes de production d'énergie qui intègrent deux ou plusieurs sources de production issues autant des sources renouvelables, que des sources conventionnelles (généralement les générateurs Diesel) ou d'une combinaison des deux sources. Un système hybride de production de l'énergie se distingue de deux façons :

- Il combine et exploite plusieurs sources et technologies de production d'énergie disponibles et facilement mobilisables [16] ;
- Sa complexité spécifique au niveau de la gestion des apports est à bien des égards identiques à celle d'un réseau électrique traditionnel [17].

Un système hybride de production d'énergie doit notamment :

- Assurer, en tout temps, l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie ;
- Obéir à des règles d'exploitation basées sur une priorisation économique des ressources énergétiques disponibles ;
- Compter sur une gestion automatisée des composants du système hybride afin de garantir la stabilité du système.

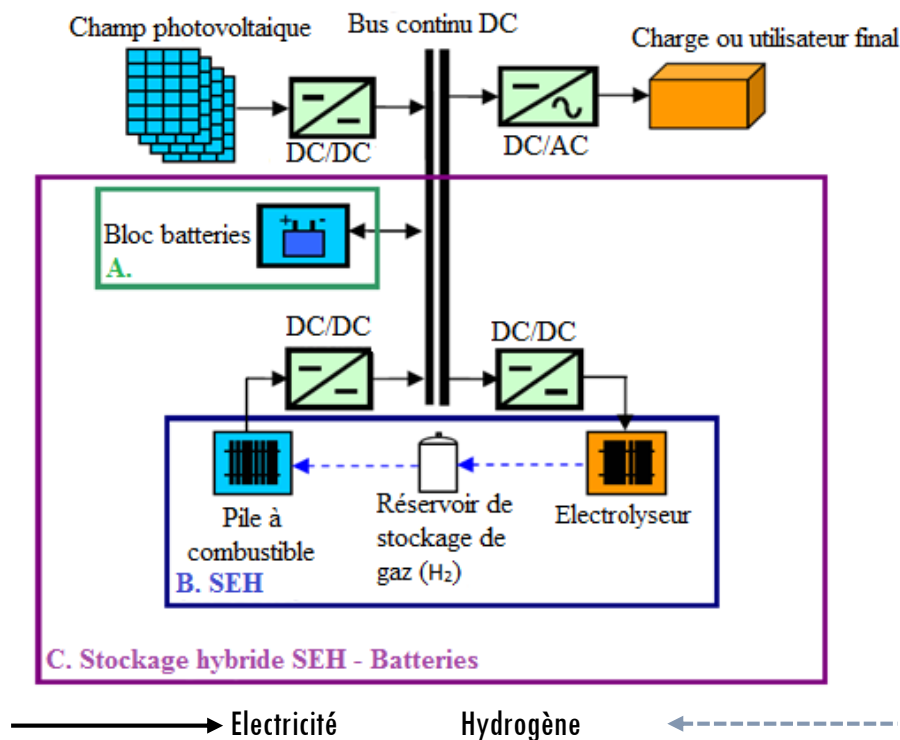
## 2-2. Matériel

### 2-2-1. Architectures des systèmes hybrides d'énergie

Les générateurs électriques d'un système hybride d'énergie peuvent être connectés en différentes configurations. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes hybrides d'énergie : architectures à bus DC [15, 18] et architectures mixtes à bus DC-AC [4, 9, 15]. La configuration à deux bus, à DC et à AC, a des performances supérieures par rapport à la configuration à un bus à DC. Cependant, la réalisation de cette configuration à deux bus est relativement compliquée à cause du fonctionnement en parallèle [19]. L'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions à la sortie.

Le système hybride de production d'énergie, étudié, a donc une configuration à un bus DC. La **Figure 1** présente l'architecture du système hybride étudié. C'est un système hybride Photovoltaïque - Stockage d'énergie via l'Hydrogène - Batteries. Ce système hybride de production d'énergie comprend un générateur photovoltaïque, un onduleur, des convertisseurs, un bus continu DC et une unité de stockage d'énergie. L'unité de stockage d'énergie est constituée :

- D'un pack batteries plomb-acide (stockage électrochimique) (A) ;
- D'un système de génération et de stockage électrochimique (Pile à combustible et accessoires, Electrolyseur et accessoires) (B) ;
- D'un système de Stockage d'Energie par l'Hydrogène (SEH)-Batteries (C).



**Figure 1** : Architecture du système étudié et les différents types de stockage

#### 2-2-1-1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est la source principale de production d'énergie. Il est constitué principalement d'un champ photovoltaïque (PV) couplé à un convertisseur de type DC/DC. Le champ PV résulte de l'association de modules PV montés en série et en parallèle. L'énergie générée par le système PV est affectée par l'irradiation solaire, la température et le type de cellule [9, 20].

### *2-2-1-2. Convertisseurs*

Dans un système hybride de production d'énergie, des convertisseurs sont utilisés pour équilibrer le flux d'énergie entre les éléments DC et AC. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes hybrides de production d'énergie à savoir les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [21].

- Les redresseurs réalisant la conversion AC/DC. Dans un système hybride de production d'énergie, ils sont souvent utilisés pour charger les batteries à partir d'une source à AC. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.
- Les onduleurs convertissent le DC en AC. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à AC ou en parallèle avec des sources à AC. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à AC pour fonctionner.
- Les hacheurs, convertisseurs DC/DC utilisés pour adapter la tension entre deux sources différentes.

L'efficacité de la conversion du courant continu en courant alternatif de la plupart des onduleurs est aujourd'hui d'environ 90 % ou plus [9]. La taille du convertisseur varie en fonction de l'application.

### *2-2-1-3. Unité de stockage de l'énergie*

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les systèmes hybrides de production d'énergie afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des mois). Le système de stockage permet aussi de stocker l'énergie en cas de production excédentaire et de compenser les éventuels déficits momentanés d'énergie ou de puissance lors des pics de consommation [22].

#### *2-2-1-3-1. Batteries*

Les batteries sont des accumulateurs électrochimiques qui fonctionnent grâce aux réactions électrochimiques aux électrodes. L'accumulateur électrochimique a la caractéristique intéressante de fournir une tension à ses bornes peu dépendante de sa charge. Cette tension est de l'ordre de quelques volts pour un élément. Le principe de fonctionnement des batteries est basé sur la conversion et la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique par une réaction électrochimique. La plupart des batteries utilisées dans les systèmes hybrides de production d'énergie sont de type plomb-acide [18]. Le choix de la taille appropriée du pack batteries nécessite une analyse inclusive des exigences de charge et de décharge de la batterie [18]. Le pack batteries du système hybride de production d'énergie étudié est directement connecté au bus DC et lui impose sa tension. Quatre batteries de 12 volts sont raccordées en série pour avoir une tension en circuit ouvert de 48 volts. En fonctionnement, cette tension varie entre 44 et 56 volts.

#### *2-2-1-3-2. Piles à combustible*

Les piles à combustible sont considérées comme une technologie prometteuse pour une production d'électricité efficace et propre [23]. La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est assez simple. Il est basé sur le procédé inverse de l'électrolyse [24]. Ce générateur génère de l'électricité en mettant en jeu un combustible et un comburant à travers un électrolyte. La pile à combustible de technologie PEM (Membrane Echangeuse de Protons) ayant une durée de vie de plus de 30 000 heures en fonctionnement permanent, a été utilisée lors de cette étude [23]. Elle a un périphérique simple et une facilité d'évacuation de l'eau produite. Dans le cas de l'utilisation du SEH (Stockage d'Énergie par l'Hydrogène) comme stockage unique, la présence d'un pack batteries de très faible capacité permet d'assurer le maintien de la tension du bus DC.

### 2-2-1-3-3. Electrolyseur

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. L'électrolyse est utilisée pour la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau. Un électrolyseur de type alcalin a été utilisé dans cette étude. En effet, les électrolyseurs de type alcalins ont de très bonnes performances au niveau des cellules (rendement potentiel : 80 %, rendement faradique : 99 %) mais ont un périphérique complexe qui induit une forte consommation intrinsèque. Cependant, l'optimisation de son périphérique permettra d'obtenir les meilleurs rendements globaux. De plus, il est préférable d'utiliser un électrolyseur haute pression afin d'éviter l'emploi d'un compresseur énergivore pour réduire la taille de l'unité de stockage de gaz [25].

## 2-3. Méthodes

### 2-3-1. Dimensionnement du système hybride d'énergie

L'hybridation d'un système de production d'énergie permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie. Il s'agit d'être capable de délivrer ponctuellement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ;
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, pendant le démarrage d'une pile à combustible, ou lorsque le soleil est masqué par des nuages devant le générateur photovoltaïque.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont et une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels. La conception des systèmes hybrides d'énergie exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de gestion efficace [26]. Les logiciels de dimensionnement sont donc des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les systèmes hybrides de production d'énergie. Les principaux facteurs du dimensionnement sont [26] :

- Les conditions environnementales du site (éclairage énergétique, température, humidité, vitesse du vent) ;
- Le profil de charge.

Pour dimensionner les différents composants du système hybride de production d'énergie, il faut définir les paramètres suivants :

- La puissance crête du champ solaire ;
- La puissance nominale des composants électrolyseur et pile à combustible ;
- La capacité nominale du stockage batterie ;
- Le volume de stockage de gaz.

Une partie des paramètres du système est fixée par analyse de son fonctionnement et de ses composants. L'autre partie est déterminée par des routines (ce sont des fichiers .m écrits en langage Matlab qui font appel au simulateur fichier (.mdl) d'optimisation pour compléter la définition du système en termes de dimensionnement. Des hypothèses et des critères seront ainsi définis.

### 2-3-1-1. Hypothèses de dimensionnement pour les composants du stockage

#### 2-3-1-1-1. Système électrolyseur

La puissance nominale ( $P_{nomel}$ ) du système électrolyseur est fixée proportionnellement à la puissance crête du champ solaire ( $P_{crête PV}$ ), traduite par la relation suivante [27] :

$$P_{nomel} = K_{el} \times P_{crête PV} \quad (1)$$

avec,  $K_{el}$ : coefficient dimensionnel de l'électrolyseur. Ce coefficient dépend du type de stockage utilisé.

#### 2-3-1-1-2. Cas du Stockage d'Énergie par l'Hydrogène (SEH) seul

Si le stockage d'énergie se fait uniquement à l'aide du dihydrogène (système PV-SEH), alors pour maximiser la production du dihydrogène,  $P_{nomel}$  doit être égale au maximum de la puissance productible par le champ solaire. Si toute la ressource solaire est disponible, de sorte que les pertes sont moindres, alors on doit pouvoir la fournir intégralement à l'électrolyseur afin de la stocker [27].

#### 2-3-1-1-3. Cas du stockage hybride SEH-Batteries

Lorsque le stockage hybride est utilisé, les besoins exprimés en dihydrogène sont moins importants puisque les batteries assurent une partie de la demande énergétique. Il y a donc une interaction entre les paramètres dimensionnels  $K_{el}$  de l'électrolyseur et  $C_{nom}$  (capacité nominale) des batteries, dont les valeurs adéquates ont été déterminées à l'issue d'une étude de sensibilité.

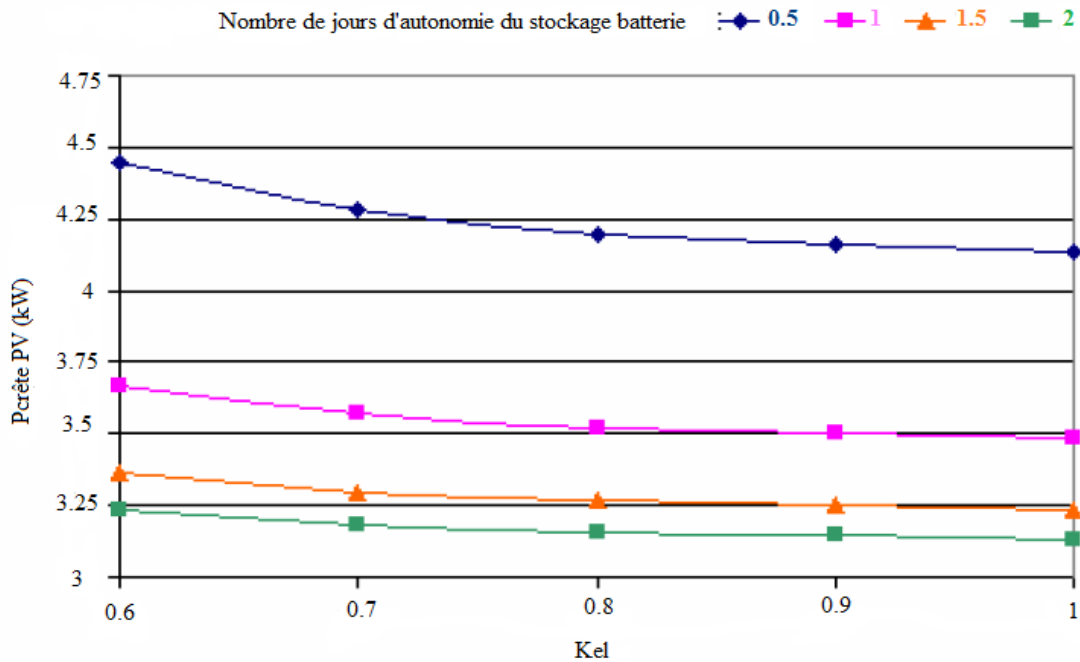
##### 2-3-1-1-3-1. Étude de sensibilité

Cette étude concerne l'impact des paramètres dimensionnels  $K_{el}$  pour l'électrolyseur et  $C_{nom}$  pour les batteries sur les performances et les résultats de dimensionnement du système PV-SEH-Batteries. L'objectif est la détermination des valeurs du couple ( $K_{el}$ ,  $C_{nom}$ ) permettant l'obtention de meilleurs résultats de simulation [4]. Il faudra déterminer les plus petites valeurs raisonnables et acceptables pour ces deux coefficients. Le cas étudié ici concerne la Côte d'Ivoire. Un profil de charge correspondant à un cas défavorable a été utilisé. Les amplitudes de variation journalière (60 % de la puissance moyenne journalière) et saisonnière (30 % de la puissance moyenne annuelle) sont importantes. Le déphasage journalier est de 8 heures par rapport à midi (plus forte consommation le soir) et le déphasage saisonnier est de 30 jours par rapport au 1er janvier. Cinq valeurs du paramètre  $K_{el}$  sont évaluées à partir de l'Equation (1). Ces valeurs sont : 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 et 1. Lorsque la valeur de  $K_{el}$  est égale à 1, la puissance nominale de l'électrolyseur est égale à la puissance crête du champ photovoltaïque. Pour des valeurs en dessous de 1, ce coefficient permet de réduire la taille de l'électrolyseur pour le cas d'un stockage hybride d'énergie. Les quatre valeurs testées du paramètre  $C_{nom}$  se traduisent en nombre de jours d'autonomie du système sur la période la plus défavorable et en termes de consommation de la charge relativement à la production du champ photovoltaïque. Ces quatre valeurs de  $C_{nom}$  sont : 0.5, 1, 1.5 et 2. Pour les vingt ( $5 \times 4 = 20$ ) cas étudiés, on observe l'impact des paramètres sur différentes données de sortie de la simulation :

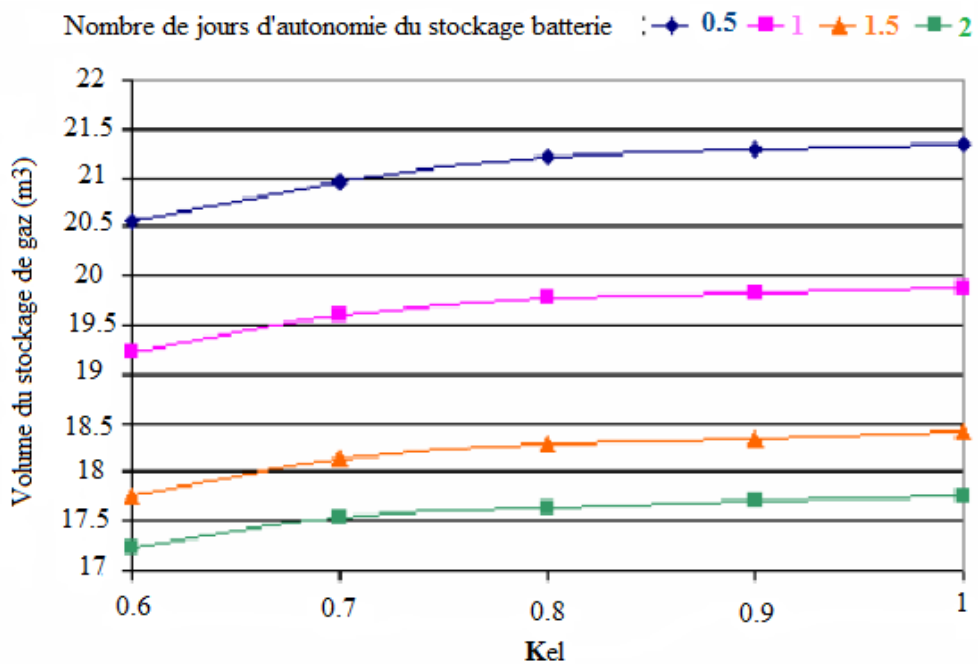
- En terme dimensionnel (sur la puissance crête du champ photovoltaïque et sur le volume du stockage de gaz) ;
- En termes de performance (sur le rendement du système global).

2-3-1-1-3-2. Impact des coefficients  $K_{el}$  et  $C_{nom}$  sur  $P_{crêtePV}$  et sur le volume du stockage de gaz

Les **Figure 2 et 3** présentent, respectivement, l'évolution du dimensionnement du champ PV et du volume de stockage de gaz en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur.



**Figure 2 :** Évolution du dimensionnement du champ PV en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur



**Figure 3 :** Évolution du volume de stockage de gaz en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur

Lorsque  $K_{el}$  est supérieur ou égal à la valeur 0,8, son impact sur la puissance crête du champ photovoltaïque et le volume de stockage de gaz est relativement faible. Pour les valeurs de  $C_{nom}$  supérieures ou égales à 1, cet impact est négligeable. En dessous de la valeur 0,8, l'impact de  $K_{el}$  est plus prononcé. Il y a une réduction du volume du dihydrogène alors que la puissance crête du champ photovoltaïque augmente, et cela, quelle que soit la valeur de  $C_{nom}$ . La valeur 0,8 du coefficient  $K_{el}$  conduit donc à un compromis acceptable pour ce qui est de la puissance crête du photovoltaïque et du volume du gaz dihydrogène. Au vu des résultats obtenus, on prendra les valeurs suivantes :  $K_{el} = 0,8$  et  $C_{nom} = 0,5$ . Ce qui nous donne :  $P_{crêtePV(0,8; 0,5)} = 4,2 \text{ kW}$  et  $Vol_{H_2(0,8;0,5)} = 21,25 \text{ m}^3$ . Le **Tableau 1** donne les réductions de la puissance crête du champ PV et du volume de gaz lorsqu'on augmente la valeur de  $C_{nom}$ .

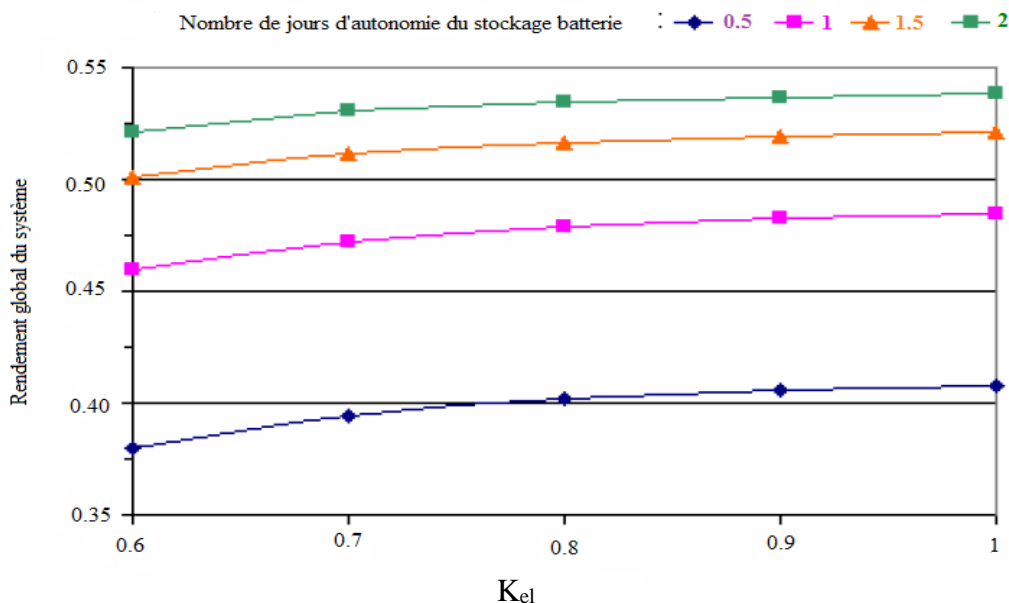
**Tableau 1 : Réduction de  $P_{crêtePV}$  et de  $Vol_{H_2}$  quand  $C_{nom}$  augmente**

Variation de $C_{nom}$	Réduction de $P_{crêtePV}$ (En % de $P_{crêtePV}(0,8 ; 0,5)$ )	Réduction de $Vol_{H_2}$ (En % de $Vol_{H_2}(0,8 ; 0,5)$ )
0,5 à 1	16,07	7,06
1 à 1,5	7,09	7,34
1,5 à 2	3,82	3,28

Pour un  $C_{nom}$  compris entre 0,5 et 1, la réduction subit par les deux paramètres dimensionnels étudiés ici est notable (16,07 % de réduction de  $P_{crêtePV}$  et 7,06 % de réduction de  $Vol_{H_2}$ ). Par contre, si on augmente la valeur de  $C_{nom}$ , la réduction de la puissance crête du champ PV est plus faible (7,09 %) tandis que la réduction de  $Vol_{H_2}$  est sensiblement la même (7,34 %). On constate que l'augmentation de  $C_{nom}$  au-delà de la valeur 1 ne conduit pas à l'amélioration du gain global sur le dimensionnement du champ photovoltaïque et du réservoir de stockage de gaz. Par conséquent, on préconise donc d'assigner au coefficient  $C_{nom}$  la valeur 1.

### 2-3-1-1-3.3. Impact des coefficients $K_{el}$ et $C_{nom}$ sur les performances du système PV-SEH-Batteries

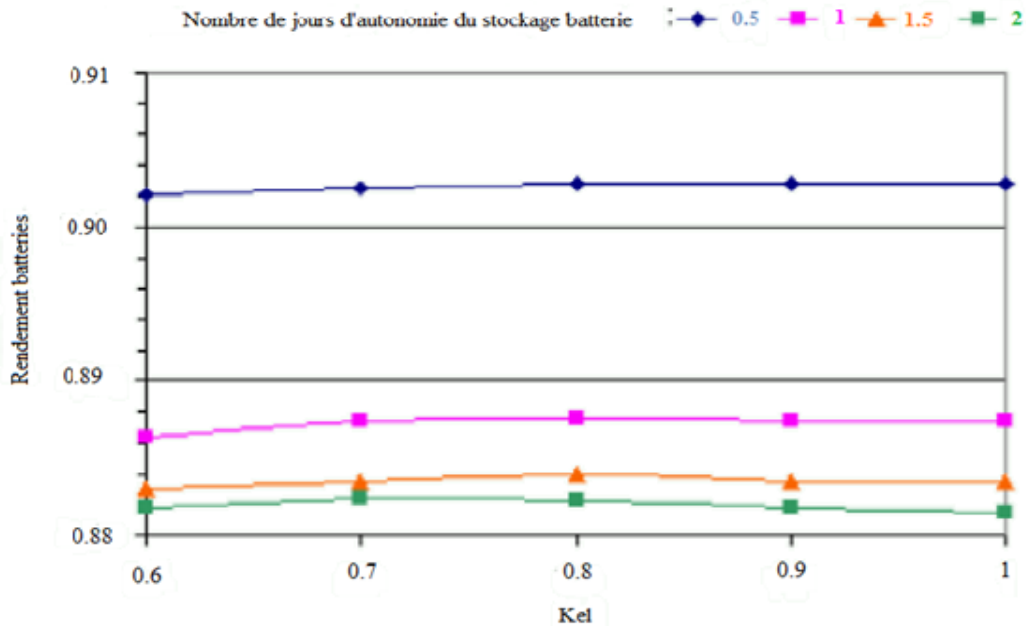
La **Figure 4** présente l'évolution du rendement global du système en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur



**Figure 4 : Évolution du rendement global du système en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur**



Le rendement global du système hybride de production d'énergie croît avec le coefficient  $K_{el}$ . Cependant, l'influence du coefficient  $K_{el}$  est relativement faible par rapport à celle du coefficient  $C_{nom}$ . Pour toute valeur de  $K_{el}$  au-delà de 0,8, le rendement global du système hybride reste pratiquement constant. En revanche, en deçà de cette valeur, le rendement global du système hybride croît de manière plus importante. L'augmentation du coefficient  $C_{nom}$  améliore le rendement global du système hybride pour n'importe quelle valeur de  $K_{el}$ . La valeur  $C_{nom} = 1$  conduit de nouveau à un compromis satisfaisant. La **Figure 5** présente l'évolution du rendement des batteries du système hybride en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur.



**Figure 5 :** Évolution du rendement des batteries du système en fonction du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries et du coefficient de dimensionnement de l'électrolyseur

La **Figure 5** permet de constater que les différentes valeurs des coefficients  $K_{el}$  et  $C_{nom}$  n'influencent pas de manière significative le rendement des batteries. Dans tous les cas testés, le rendement reste au voisinage de 0,8. Ce résultat est en conformité avec les valeurs relevées dans le cas de systèmes réels [27]. De manière générale, on observe une grande influence du nombre de jours d'autonomie du stockage batteries sur le rendement global du système hybride et celui des batteries. A l'inverse, le coefficient  $K_{el}$  de l'électrolyseur a une faible influence sur ces rendements. Au vu des différents résultats obtenus, les valeurs des paramètres dimensionnels préconisées sont :  $K_{el} = 0,8$  et  $C_{nom} = 1$ . Des considérations économiques pourraient permettre de préciser les valeurs optimales du couple  $(K_{el}, C_{nom})$ . Les réductions de la puissance crête du champ photovoltaïque et du volume de stockage de gaz ainsi que l'accroissement du rendement global du système se feront aux dépens de l'augmentation de la taille du stockage batteries. Cependant, cette proposition basée sur des critères techniques conduit à un compromis acceptable entre, d'une part le dimensionnement du champ photovoltaïque et du réservoir de stockage de gaz, et d'autre part, le rendement global du système hybride de production d'énergie.

#### 2-3-1-1-4. Le système Pile à Combustible

Quel que soit le type de stockage utilisé, la puissance nominale du système pile à combustible est fixée de telle sorte qu'il puisse assurer la fourniture d'énergie à la charge. Cette puissance nominale du système pile à combustible est donnée par [27] :

$$P_{nomfc} = K_{fc} \times P_{maxcharge} \quad (2)$$

Le coefficient  $K_{fc}$  est introduit afin de tenir compte des pertes dans les convertisseurs DC/DC et DC/AC. L'observation des rendements des convertisseurs sur une année de simulation a permis d'évaluer la valeur de  $K_{fc}$ . Ainsi, la valeur de  $K_{fc}$  obtenue est de  $K_{fc} = 1,1$  [27].

### 2-3-1-1-5. Le système batteries

La capacité disponible du pack batteries doit pouvoir permettre au système hybride d'être autonome durant quelques jours pendant la période la plus défavorable (lorsque le soleil est masqué par des nuages devant le générateur photovoltaïque). Pour un stockage batteries seules (système PV-Batteries), cette autonomie est fixée à quatre jours [27]. Pour un stockage de type hybride (système PV-SEH-Batteries), le nombre de jours d'autonomie est fixé à un jour, car la présence du SEH permet de combler le déficit d'énergie nécessaire à l'autonomie du système [27].

### 2-3-1-1-6. Les convertisseurs

Leurs puissances nominales correspondent aux puissances nominales des composants auxquels ils sont connectés.

## 2-3-2. Dimensionnement du champ Photovoltaïque (PV)

### 2-3-2-1. Cas des systèmes PV-SEH et PV-SEH-Batteries

Un algorithme d'optimisation (dichotomie) permet de déterminer la puissance crête du champ PV de sorte que l'énergie initialement présente dans le stockage (au début de l'année de simulation) soit égale à celle présente en fin de simulation, ce qui traduit l'autonomie énergétique du système sur l'année de fonctionnement. Pour des systèmes PV-SEH et PV-SEH-Batteries, la variable énergétique observée est la quantité de dihydrogène (nombre de moles) dans le stockage de gaz. Cette quantité est d'abord fixée à un seuil élevé et sa variation dans le stockage doit être globalement nulle sur l'année [27, 28]. Cela suppose que la puissance crête du champ PV doit être déterminée de sorte que, la production de dihydrogène par l'électrolyseur sur l'année soit égale à la consommation de la pile à combustible. L'algorithme de gestion de l'énergie veille à ce que l'état de charge SOC des batteries soit compris entre les bornes minimales  $SOC_{min}$  et maximales  $SOC_{max}$  autorisées, pour ce qui est du système PV-SEH-Batteries [3, 29].

### 2-3-2-2. Cas du système PV-Batteries

La démarche est sensiblement différente pour le système PV-Batteries. Ici, c'est par optimisation qu'on calcule la puissance crête du champ PV installée de manière à ce que l'état de charge du système batteries (SOC) ne dépasse pas la borne minimale autorisée ( $SOC_{min}$ ). L'algorithme de gestion de l'énergie veille à respecter la condition d'utilisation du stockage batteries ( $SOC < SOC_{max}$ ) [3, 19, 29]. Cette démarche de dimensionnement du champ PV s'explique par le fait que les batteries sont utilisées de manière journalière pour le stockage.

## 2-3-3. Dimensionnement du volume de stockage de gaz

Après avoir dimensionné le champ PV, on définit la quantité initiale de dihydrogène nécessaire à l'autonomie du système hybride. On dimensionne par rapport à un mois pendant une année type. Ce dimensionnement consiste à calculer la quantité totale de dihydrogène produite par l'électrolyseur et la quantité totale de dihydrogène consommée par la pile à combustible. La différence entre ces deux quantités de dihydrogène de tous les mois correspond au volume de stockage.

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Algorithmes de gestion de l'énergie

De nombreux scénarios de gestion peuvent être proposés en fonction des sources d'énergie disponibles, de la consommation d'énergie et de l'état de charge de la batterie pendant 24 heures pour pouvoir assurer le bon déroulement de l'algorithme [30 - 32]. Dans notre cas, nous avons utilisé un logiciel de simulation informatique, en l'occurrence Matlab®-Simulink version R2012a, qui permet de déterminer, à chaque instant, le fonctionnement des différents éléments qui constituent le système hybride de production d'énergie.

##### *3-1-1. Différents modes de fonctionnement du système*

Le système hybride de production d'énergie étudié est composé d'un champ PV de 5 kWc, d'une pile à combustible d'une puissance de 5 kW et d'un bloc batteries de capacité nominale 140 Ah par batterie. Le système hybride de production d'énergie est conçu pour alimenter une charge (DC ou AC) et un électrolyseur. On considère que :

- Le champ PV est la source principale ;
- Le bloc batteries est utilisée à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction ;
- La pile à combustible est considérée comme une source de secours ;
- La charge est toujours connectée ;
- L'électrolyseur est considéré comme une charge auxiliaire pour dissiper le surplus de production.

Pour rendre l'étude plus simple, nous supposons que chaque composant a deux états : actif et inactif en fonction des périodes du jour. Les **Tableaux 2 et 3** donnent l'état de chaque composant du système hybride. En effet, en fonction des sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie, nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système.

**Tableau 2 : État de chaque composant constituant le système hybride de production d'énergie**

Etat		Actif	Inactif
Source principale	Champ photovoltaïque	Pendant un jour ensoleillé	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pendant la nuit</li> <li>✓ Pendant un jour nuageux</li> <li>✓ En cas de panne</li> </ul>
Sources auxiliaires	Batteries	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pendant l'incapacité de la source principale, par exemple lorsque :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Les conditions climatiques sont faibles</li> <li>2. La demande de la charge est supérieure à la production</li> <li>3. En cas de panne de la source principale</li> </ol> </li> <li>✓ Lorsque l'état de charge est compris entre 50 et 90% [27]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pendant le fonctionnement normal de la source principale (PV)</li> <li>✓ La demande de la charge égale ou inférieure à la production (<math>P_{ch} \leq P_{pv}</math>)</li> </ul>
	Pile à combustible	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pendant l'incapacité des sources principales,</li> <li>✓ SOC de la batterie inférieur à seuil bas (<math>SOC_{min} &lt; 0,5</math>) [27]</li> </ul>	
Charge principale	DC et AC	La charge est toujours connectée.	
Charges auxiliaires	Batterie	En cas d'excès d'énergie et SOC est inférieur à seuil bas	Lorsque SOC est supérieur à seuil haut ( $SOC_{max} = 0,90$ ) [27].
	Electrolyseur	En cas d'excès d'énergie et SOC est supérieur à seuil haut.	En cas de manque d'énergie ou la demande est satisfaite ( $P_{ch} = P_{sp}$ )

**Tableau 3 : Différents scénarios de fonctionnement du système hybride de production d'énergie**

Cas	Période	PV	Batterie	$P_{Diff}$	PAC	SOC	EL	Description
1	Pendant un jour ensoleillé ou nuageux	Ok	Repos	$P_{Diff} = 0$	OFF	$0,5 < SOC < 0,9$ [27]	OFF	$P_{Ch} = P_{PV}$
2		Ok	Décharge (source)	$P_{Diff} < 0$				$P_{Ch} = P_{PV} + P_{Bat}$
3		×			$P_{Ch} = P_{Bat}$			
4		Ok	Repos	$P_{Diff} > 0$	ON	$P_{Ch} = P_{PV} + P_{PAC}$		
5		×			$P_{Ch} = P_{PAC}$			
6		Ok	Chargé (charge)	OFF	$P_{PV} - P_{Ch} = P_{Bat}$			
7		Ok	Repos		$SOC > 0,9$ [27]	ON		$P_{PV} - P_{Ch} = P_{EL}$
8	Pendant la nuit	×	Décharge	$P_{Diff} < 0$	OFF	$0,5 < SOC < 0,9$ [27]	OFF	$P_{Ch} = P_{Bat}$
9		×			ON		$P_{Ch} = P_{Bat} + P_{PAC}$	
9		×	Repos		ON	$SOC < 0,5$ [27]	OFF	$P_{Ch} = P_{PAC}$
Ok	Fonctionnement normal (actif)							
×	Inactif							

### 3-1-2. Système de supervision du système hybride de production d'énergie

La gestion d'énergie entre les différents composants du système hybride de production d'énergie est assurée par une technique de gestion à base de règles déterministes. Elle est conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de ce système hybride étudié. L'organigramme de la **Figure 6** donne le principe

de fonctionnement de la stratégie de gestion de l'énergie du système hybride. On a initialisé d'abord les paramètres des différents sous-systèmes et les données climatiques (température, éclairement). Ensuite, on a estimé la puissance totale  $P_{SP}$  produite par la source principale (PV) et la demande de la charge  $P_{Ch}$  évaluée à chaque instant, afin de calculer la différence de puissance  $P_{Diff}$ .

$$P_{Diff} = P_{SP} - P_{Ch} \tag{3}$$

Si  $P_{Diff} = 0$ , toute la puissance produite par la source renouvelable (PV) est égale à la puissance requise par la charge principale ( $P_{SP} = P_{Ch}$ ). Par conséquent, l'état de charge des batteries reste constant (batterie au repos) en négligeant leur autodécharge. Les interrupteurs  $S$  (entre l'électrolyseur et le bus DC) et  $S_f$  (entre la pile à combustible et le bus DC) sont en état OFF. Si  $P_{Diff} > 0$ , la puissance générée par la source principale (PV) est supérieure à la demande de la charge. Par conséquent, il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et stocker l'excédent. Si  $P_{Diff} < 0$ , l'énergie produite par la source renouvelable (PV) n'est pas suffisante pour alimenter la charge. Dans ce cas, les batteries et la pile à combustible interviennent pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge.

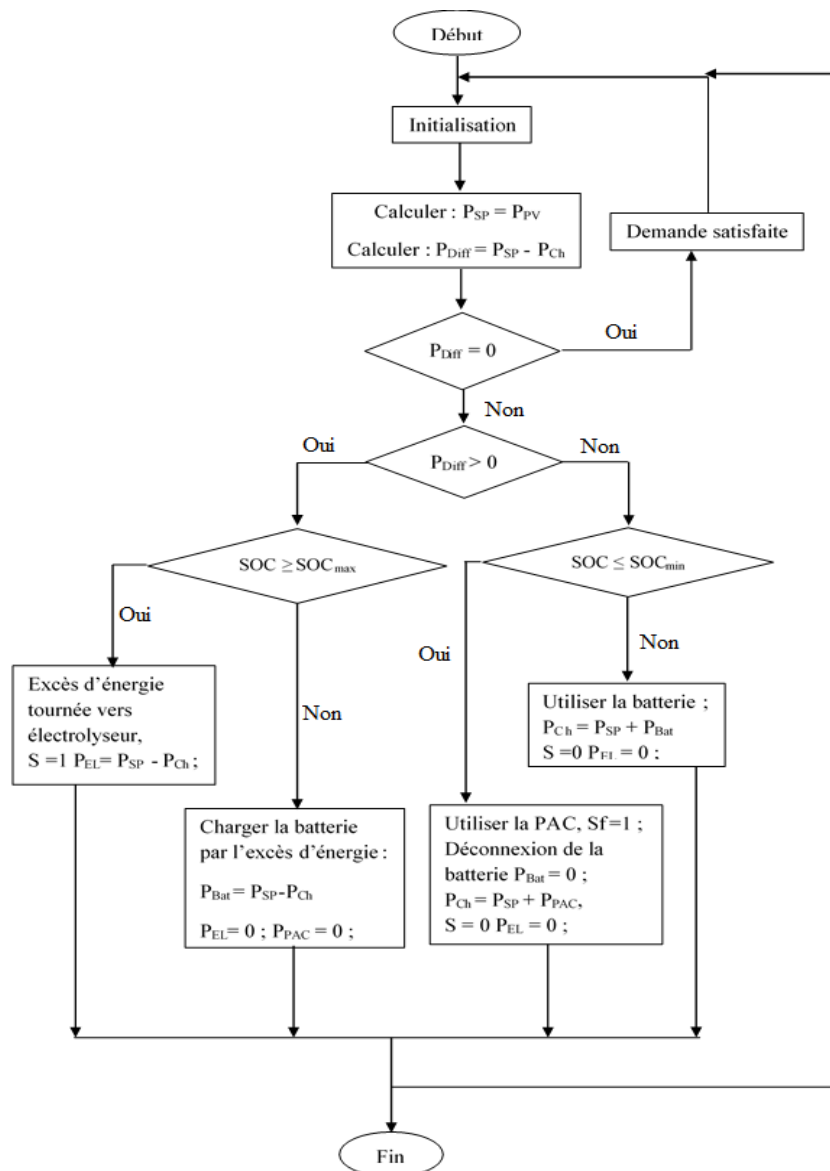


Figure 6 : Organigramme de gestion de l'énergie du système hybride de production d'énergie

#### 4. Conclusion

Cette étude nous a permis de définir la taille de notre système et de choisir ses différents composants sur la base de comparaison de leurs caractéristiques. Le dimensionnement permet l'obtention d'un bon fonctionnement global et limite le coût de l'installation. Il nous a permis d'établir des relations entre les puissances des composants par des règles simples, de définir la puissance solaire et le volume de stockage nécessaire pour répondre à la demande d'une charge sur un site donné. Le choix des composants électrochimiques est difficile car il faut trouver le meilleur compromis entre efficacité, fiabilité et durabilité. Ainsi, l'électrolyseur alcalin nous a semblé préférable pour son efficacité et sa longue durée de vie. Par contre, son périphérique doit être optimisé en termes de fiabilité et de consommation intrinsèque. La pile à combustible de technologie PEM a été choisie pour son temps de démarrage rapide, sa structure solide, son insensibilité au CO<sub>2</sub> et sa compacité. Une étude de sensibilité a été faite afin de déterminer les valeurs du couple ( $K_{el}$ ,  $C_{nom}$ ) permettant l'obtention de meilleurs résultats de simulation. Cette étude nous a permis aussi de mettre en place, une architecture électrique et une stratégie de contrôle capables de limiter les pertes de conversion et d'optimiser la gestion de l'énergie au sein du système.

#### Références

- [1] - V. KHARE, S. NEMA and P. BAREDAR, "Solar-wind hybrid renewable energy system", *a review. Renew Sustain Energy Rev*, 58 (2016) 23 - 33
- [2] - B. BOYA BI and P. GBAHA, "Sizing of an electric energy production hybrid system", *Asian Journal of Science and Technology*, Vol. 08, Issue, 11, (November 2017) 6669 - 6676 p.
- [3] - R. BELFKIRA, L. ZHANG and G. BARAKAT, "Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit", *Solar Energy*, 85 (2011) 100 - 110
- [4] - Y. SAWLE, S. C. GUPTA and A. K. BOHRE, "Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 2217 - 2235
- [5] - LUIS and al., "Assessment of on-site steady electricity generation from hybrid renewable energy systems in Chile", *Applied Energy (Elsevier)*, Vol. 250, (2019) 1548 - 1558 p.
- [6] - E. OMAR and A. ABDULRAHMAN, "Integrated Economic Adoption Model for residential grid-connected photovoltaic systems : An Australian case study", *Energy Reports (Elsevier)*, Vol. 5, (2019) 310 - 326
- [7] - K. IBRAHIM and S. CHINDO, "Renewable energy consumption and economic growth nexus : A fresh evidence from West Africa", *Energy Reports (Elsevier)*, Vol. 5, (2019) 384 - 392 p.
- [8] - ARMIN and al., "Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation", *Energy Reports (Elsevier)*, Vol. 5, (2019) 231 - 241 p.
- [9] - A. M. HEMEIDA and al., "Optimum design of hybrid wind/PV energy system for remote area", *Ain Shams Engineering Journal*, 11 (2020) 11 - 23
- [10] - S. SARANGTHEM and F. EUGENE, "Modeling size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system", *Energy*, 143 (2018) 719 - 31
- [11] - K. ABLA and al., "Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system", *Energy*, 153 (2018) 743 - 62
- [12] - G. NARGES and al., "Optimization a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability", *Energy*, 154 (2018) 581 - 91
- [13] - A. A. MASUD and al., "The application of Homer optimization software to investigate the prospects of hybrid renewable energy system in rural communities of Sokoto in Nigeria", *Int J. Elec Comp Eng (IJECE)*, 7 (2) (2017) 596 - 603

- [14] - M. JAYACHANDRAN and G. RAVI, "Design and optimization of hybrid micro-grid system", *Energy Procedia*, 117 (2017) 95 - 103
- [15] - R. DUFO-LOPEZ and al., "Stochastic-heuristic methodology for the optimization of components and control variables of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems", *Renewable Energy*, 99 (2016) 919 - 935
- [16] - M. BELHAMED, S. MOUSSA and A. KAABECHE, "Production d'électricité au moyen d'un système hybride éolien - photovoltaïque - diesel", *Revue Energies Renouvelables: Zones Arides*, (2002) 49 - 54
- [17] - C. ASHARI and al., "Optimum Operation Strategy and Economic Analysis of a Photovoltaic - Diesel - Battery -Mains Hybrid Uninterruptible Power Supply", *Renewable Energy*, Vol. 22, Issues 1-3, (March 2001) 247 - 254 p.
- [18] - A. ASKARZADEH and L. D. S. COELHO, "A novel framework for optimization of a grid independent system : A case study of Iran", *Solar Energy*, 112 (2015) 383 - 396
- [19] - L. HUANG and al., "Research on optimal configuration of AC/DC hybrid system integrated with multiport solid-state transforms and renewable energy based on a coordinate strategy", *Electrical Power and Energy Systems*, 119 (2020) 105880
- [20] - S. IRTAZA, "Near-optimal standalone hybrid PV/WE system sizing method", *Sol Energy*, 157 (2017) 727 - 34
- [21] - A. NEFFATI, "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision. floue optimisée pour véhicule électrique hybride", *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier*, (2013) 12 p.
- [22] - G. KOUCOI and al., "Energy Management Strategies for Hybrid PV / Diesel Energy Systems: Simulation and Experimental Validation", *Int J Energy Power Eng*, 5 (2016) 6 - 14. doi: 10.11648/j.ijep.20160501.12
- [23] - G. SHEN, "Multi-functional anodes boost the transient power and durability of proton exchange membrane fuel cells", *NATURE COMMUNICATIONS* /, 11 (2020) 1191 | <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14822-y> | [www.nature.com/naturecommunications](http://www.nature.com/naturecommunications)
- [24] - N. M. SID and al., "Gestion de l'énergie d'un système hybride pile à combustible/ batterie basée sur la commande optimale", *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation*, 03 (2015) 010 - 024
- [25] - MARIA and al., " Experimental and modelling study of an electrochemical hydrogen compressor ", *Chemical Engineering Journal (Elsevier)*, Vol. 369, (2019) 432 - 442
- [26] - M. A. ELHADIDY and S. M. SHAAHID, "Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems", *Renewable Energy*, Vol. 66, N° 1 (1999) 129 - 139 p.
- [27] - J. LABBE, "l'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés", *Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris*, (2006)
- [28] - EMANUELE and al., "Hybrid Predictive Models for Accurate Forecasting in PV Systems ", *Energies*, Vol. 6, (2013) 1918 - 1929 p.
- [29] - H. SHAYEGHI and Y. HASHEMI, "Potentiometric of the Renewable Hybrid System for Electrification of Gorgor Station", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 8, N° 1 (Feb. 2020) 1 - 14 p.
- [30] - LI and al., "A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power", *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3 (2018) 2 DOI 10.1186/s41601-017-0074-9
- [31] - B. SING and S. SINGH, "GA-based optimization for integration of DGs, STATCOM and PHEVs in distribution systems ", *Energy Reports (Elsevier)*, Vol. 5, (2019) 84 - 103 p.
- [32] - XIANGJUN and al., "Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations ", *State Grid (Springer)*, Vol. 4, N° 4 (2016) 593 - 603 p.