

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on commence par l'étude d'un système à deux sources renouvelables et un système de stockage hybride, contenant des batteries et des supercondensateurs. Ensuite on présente un système à une source renouvelable avec une source d'appoint et un système hybride de stockage. Enfin le chapitre se termine par une application.

3.2 Système multi-sources avec stockage hybride

L'hybridation consiste à associer plusieurs sources d'énergie et unités de stockage au sein d'un même système afin d'en optimiser la production et la gestion de l'énergie. Les sources éolienne et solaire PV ont été choisies et pour le stockage hybride des batteries et des supercondensateurs.

La figure 3.1 montre le système à étudier. On suppose que l'habitat est menu d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif et que les batteries contiennent un régulateur de charge.

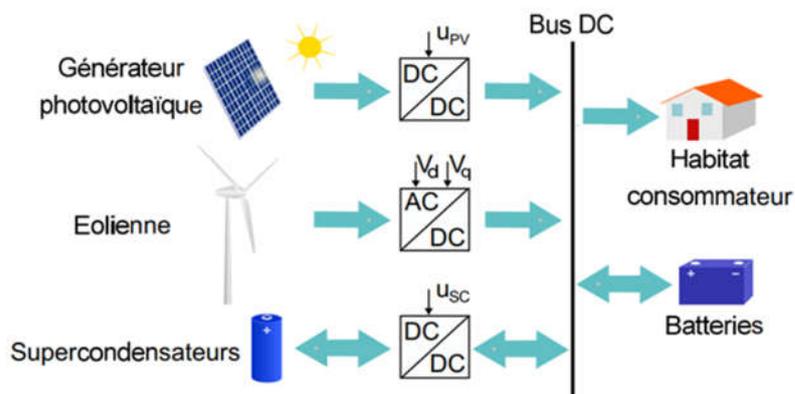


Figure 3.1 Système multi sources avec stockage hybride

3.3 Description du système multi sources

3.3.1 Source éolienne

3.3.1.1 Conversion de l'énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie du vent est connue depuis longtemps où elle a été utilisée dans les moulins à vent pour moudre les grains. Son principe repose sur la transformation d'une partie de l'énergie disponible dans le vent en énergie de rotation dans l'arbre d'une turbine, puis en énergie électrique via une génératrice électrique. La figure 3.2a montre un exemple d'une chaîne de conversion éolienne. Elle est composée d'une turbine éolienne montée directement sur une génératrice à aimants permanents (GSAP), d'un redresseur MLI triphasé qui est connecté au bus CC .

La puissance disponible sur l'arbre de la génératrice est fonction de la vitesse du vent et de la rotation de la turbine (fig. 3.2b). Pour chaque vitesse du vent il y aura donc une vitesse de rotation pour laquelle la puissance de sortie sera maximale. Donc si la vitesse de rotation est fixe, il ne sera pas possible de profiter du maximum de puissance disponible. Par contre, dans une chaîne de conversion à vitesse variable, les convertisseurs d'électronique de puissance sont normalement commandés de façon à suivre le point de puissance maximale.

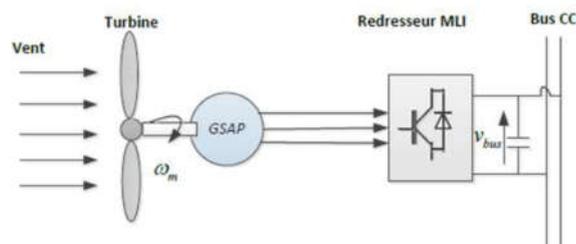


Figure 3.2a Exemple de la chaîne éolienne

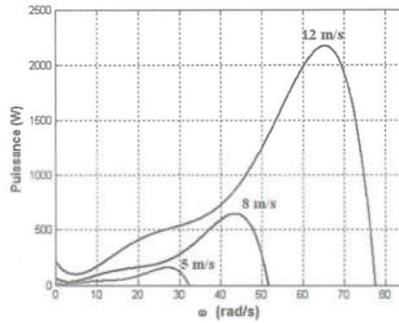


Figure 3.2b Courbes de puissance éolienne pour trois vitesses différentes de vent

3.3.1.2 Configurations

L'utilisation de différents types de génératrices en combinaison avec des différents types de convertisseurs d'électronique de puissance rendent possibles plusieurs configurations de la chaîne de conversion éolienne. Chaque structure, a ses propres avantages et inconvénients, tant au niveau de la contrôlabilité, du rendement et de la taille.

3.3.1.3 Modélisation

A) Puissance

La puissance maximale est proportionnelle au cube de la vitesse de vent (figure 3.3) . Ceci s'explique parce que la valeur du C_p maximal est constante pour toutes les vitesses de vent. Donc, pour une chaîne de conversion à vitesse variable et en supposant que le réglage permet de suivre parfaitement le point de C_p maximal, la puissance dans l'arbre de la machine est donnée par l'équation 3.1.

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times C_{pmax} \times A_w \times V_w^3 \quad (3.1)$$

Où

ρ est la densité de l'air (kg/m³), C_{pmax} coefficient de puissance maximale, A_w surface traversée par la masse d'air (balayée par le rotor).

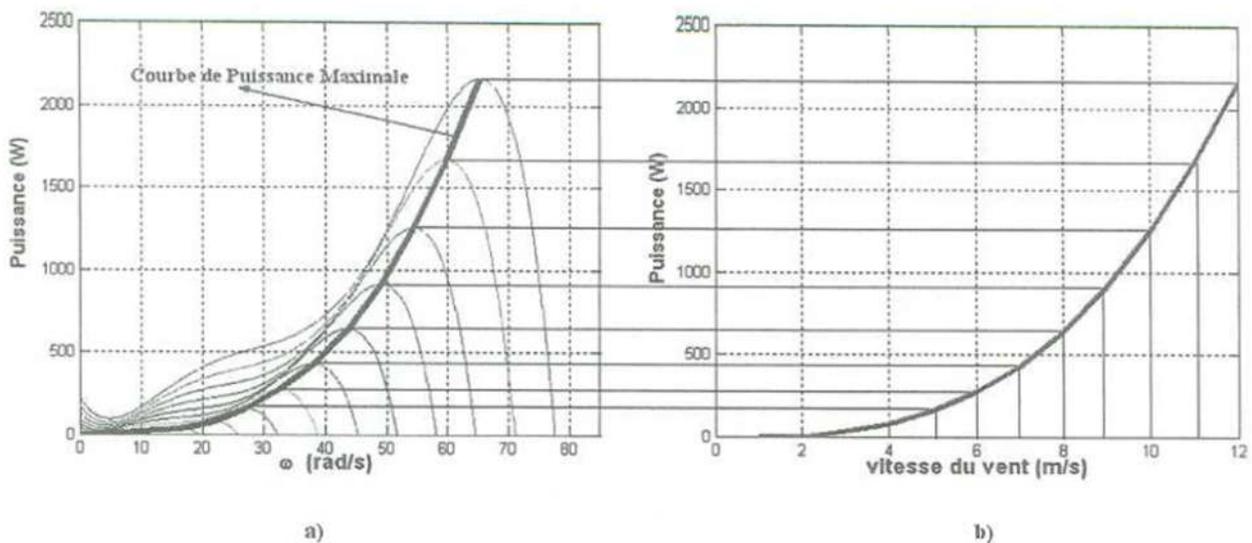


Figure 3.3 : a) Courbe de puissance maximale en fonction de la vitesse de rotation
b) Courbe de puissance maximale en fonction de la vitesse du vent

Protection

Afin de protéger la turbine éolienne, à partir d'une certaine vitesse de vent la puissance de sortie est limitée à travers plusieurs mécanismes. En général les turbines de basse puissance utilisent plutôt le système de décrochage aérodynamique alors que les turbines de grande puissance utilisent le contrôle d'angle de calage des pales, le contrôle de couple et de vitesse pour maintenir une puissance électrique constante aux bornes du générateur.

La courbe de puissance d'une turbine éolienne (figure 3.4) est caractérisée par une vitesse de démarrage (anglais : cut-in speed) qui correspond à la vitesse du vent pour laquelle la puissance contenue dans le vent est suffisante pour amorcer le système. Ensuite, il y a une région où la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent à laquelle la turbine atteint sa puissance nominale est nommée vitesse nominale (anglais : rated speed). La puissance nominale est maintenue constante jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne trop importante et la turbine doit alors être arrêtée (anglais : cut-off speed).

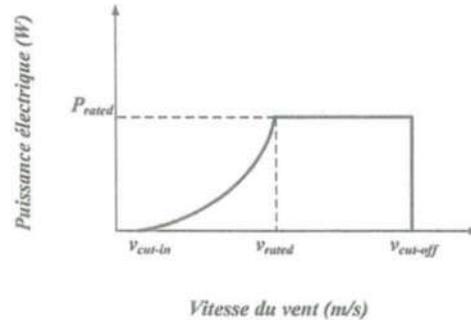


Figure 3.4 Courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent d'une turbine éolienne

B) Energie éolienne moyenne

L'énergie éolienne annuelle moyenne par mètre carré de rotor peut être exprimée en fonction de la puissance éolienne moyenne par jour de la façon suivante (équation 3.2):

$$E_W = \sum_m^{12} \frac{P_W}{A_W} \times D_m \quad (3.2)$$

Où m représente les mois et D_m représente le nombre de jours de chaque mois.

3.3.2 Chaîne PV

3.3.2.1 Description

La conversion PV est la transformation du rayonnement solaire, tombant sur une surface d'un matériau semi conducteur, en énergie électrique. Ces matériaux sont présentés sous formes de modules, constitués de plusieurs cellules. L'ensemble de modules forme des panneaux qui sont à leur tour donnent naissance aux champs PV.

3.3.2.2 Modélisation

A) Circuit équivalent

Un dispositif photovoltaïque peut être modélisé comme une source de courant idéale (constante) avec une diode en parallèle, une résistance série et une résistance parallèle. La figure 3.5a montre le circuit équivalent d'une cellule solaire à une diode.

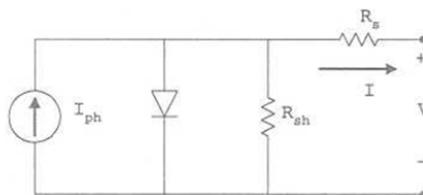


Figure 3.5a Circuit équivalent à une diode d'une cellule solaire

B) Equation I-V

L'équation qui décrit le point d'opération d'une cellule solaire peut être exprimée, en utilisant la première loi de Kirchhoff, par l'équation 3.3. Pour l'obtention du modèle d'un module ou un champ PV il suffit d'introduire le nombre de modules série et parallèle dans l'équation précédente (série tension augmente, parallèle courant augmente).

$$\begin{cases} I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(v_{cell} + I_{cell}R_s)}{\tau kT}\right] - 1 \right\} - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{sh}} \\ I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}\right) \exp\left(-\frac{V_{oc}}{AV_T}\right) \\ V_T = \frac{kT}{q} \end{cases} \quad 3.3$$

Où

I_{ph} est le photocourant qui dépend du rayonnement solaire et de la température de la cellule.

I_0 est le courant de saturation de la diode, q la charge élémentaire d'un électron, A représente le facteur d'idéalité de la diode, k est la constante de Boltzmann et T la température.

La figure 3.5b montre la courbe courant-tension typique d'un module photovoltaïque.

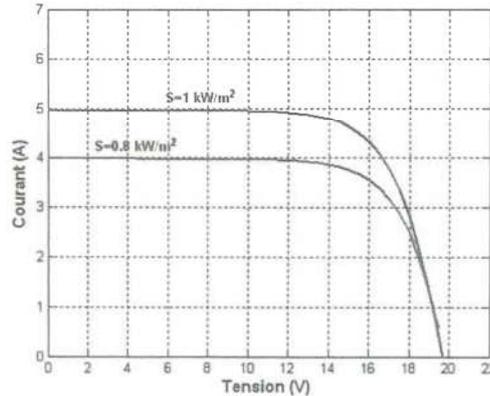


Figure 3.5b Courbe courant-tension typique d'un module photovoltaïque

Extension

Généralement, dans la fiche technique des panneaux solaires les paramètres des courants et de tensions sont estimés pour des conditions d'opération standard (STC). Cependant le courant et la tension sont modifiés en fonction du rayonnement solaire reçu par le module photovoltaïque, les équations qui permettent de corriger les valeurs calculées pour des conditions d'opération différentes sont données par les équations suivantes :

$$\Delta T = T - T_r \quad (3.4)$$

$$\Delta I = C_{T,I} \times \left(\frac{S}{S_{ref}}\right) \times \Delta T + \left(\frac{S}{S_{ref}} - 1\right) \times I_{CC} \quad (3.5a)$$

$$\Delta V = -C_{T,V} \times \Delta T - R_S \times \Delta I \quad (3.5b)$$

$$V'_{m,PV} = V_{m,PV} + \Delta V \quad (3.6a)$$

$$I'_{m,PV} = I_{m,PV} + \Delta I \quad (3.6b)$$

$$T = T_A + 0,02 \times S \quad (3.7)$$

C) La puissance et l'énergie solaire moyenne

• Puissance

La puissance est donnée par la formule 3.8.

$$P_{pv} = \tau_{PV} \times S_{PV} \times E_C \quad (3.8)$$

où

τ_{PV} est le rendement global du générateur PV, S_{PV} la surface effective des panneaux (m^2) et E_C l'éclairement (W/m^2).

Afin de profiter au maximum de l'énergie qu'un panneau photovoltaïque peut fournir, il est nécessaire de le faire travailler au point de puissance maximale. Ceci est fait en connectant un convertisseur DC/DC pour adapter la tension aux bornes des panneaux à celle qui correspond au point d'opération optimal. Ces convertisseurs sont nommés MPPT (anglais : Maximum Power Point Tracker). Comme la courbe de courant vis tension du panneau change en fonction du rayonnement solaire, les coordonnées du point d'opération optimal changent aussi en fonction du rayonnement solaire.

Les figures 3.6 a et b montrent un exemple de courbes I-V et de puissances maximales en fonction du rayonnement solaire.

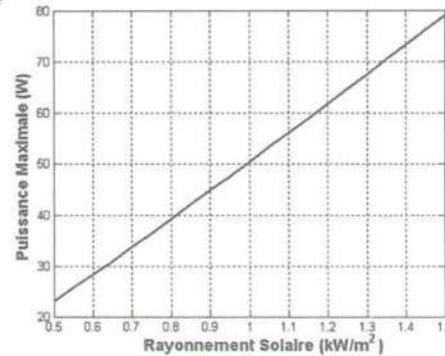
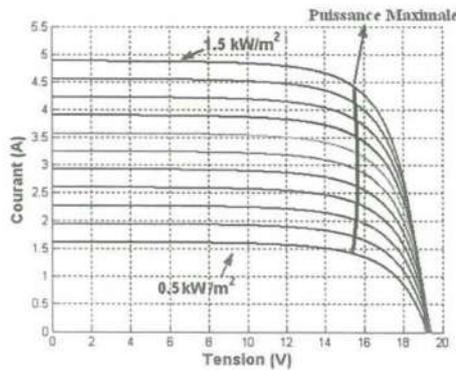


Fig. 3.6a Caractéristiques I-V pour différentes valeurs d'éclaircements à T_c constante

Fig.3.6b Puissance maximale en fonction du rayonnement solaire

- **Energie**

L'énergie produite pour une journée est donnée par l'équation 3.9.

$$E_{PV} = E_{Cj} \times S_{PV} \times \tau_{PV} \quad (3.9)$$

Avec

E_{Cj} représente l'énergie solaire totale moyenne par jour reçue par la surface effective des panneaux (S_{PV}) pour le rendement du générateur PV (τ_{PV}).

3.3.3 Maximisation de la Puissance produite

3.3.3.1 Nécessité d'un convertisseur

Différentes architectures des convertisseurs sont associées avec les systèmes de puissance multi-sources éolien /photovoltaïque dont l'objectif principal est de maximiser la production de puissance des sources. Pour cela, chacune est connectée à un convertisseur de puissance, qui permet de contrôler son point de fonctionnement, et le relie au bus commun avec l'adaptation nécessaire.

Dans cette étude, on se limite aux convertisseurs des générateurs PV. Pour récupérer la puissance maximale produite par le générateur PV (GPV) pour différentes variation de l'éclaircement et de température, un convertisseur (hacheur) commandée (dite MPPT) doit être inséré aux bornes du GPV. Ce convertisseur permet aussi d'adapter les tensions à la demande de la charge.

3.3.3.2 Schéma équivalent

La figure 3.7 montre un exemple de convertisseur DC/DC élévateur (boost). Ce convertisseur peut être commandé à travers une technique MPPT.

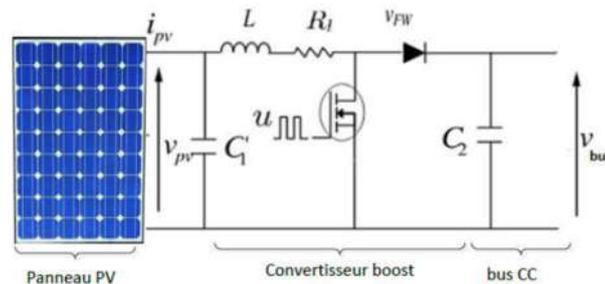


Figure 3.7 Schéma électrique d'un convertisseur élévateur DC/DC

3.3.3.3 Modèle du convertisseur DC/DC

En appliquant les lois de Kirchhoff au circuit précédent de la figure 3.7, on obtient le modèle d'état du convertisseur boost donné par l'équation 3.10.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = -\frac{R_L}{L_1} i_L - \frac{1-u}{L} (v_{FW} + v_{bus}) + \frac{1}{L} v_{pv} \\ \frac{d}{dt} v_{pv} = -\frac{1}{C_1} i_L + \frac{1}{C_1} i_{pv} \end{cases} \quad (3.10)$$

Avec

L est la self Inductance du convertisseur de résistance interne R_L , C_1 la capacité à l'entrée du boost qui sert à filtrer la tension aux bornes du panneau (GPV) et C_2 la capacité du bus CC. La commande (en ouverture et fermeture) du transistor MOSFET est représentée par le signal u et v_{FW} la chute de tension au niveau de la diode anti retour.

3.4 Description du stockage hybride (batteries/supra condensateurs)

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez (cas de batteries). Elles sont aussi obligatoires pour assurer à chaque instant l'équilibre énergétique dans le circuit électrique en stockant ou déstockant la différence entre puissance produite et puissance consommée à chaque instant (cas de supra condensateurs).

3.4.1 Batteries

3.4.1.1 Principe de fonctionnement

Les batteries sont la solution la plus utilisée pour un stockage électrochimique de faibles dimensions. Elles réalisent une réaction d'oxydoréduction selon le principe de la pile pour emmagasiner à la charge de l'énergie électrique, qui peut être restituée à la décharge avec un bon rendement, autour de 85 % selon les types de batteries.

3.4.1.2 Les différentes technologies

Trois grandes familles de batteries sont aujourd'hui utilisées par les industriels, selon la nature de leurs électrodes:

- les batteries Plomb-acide;
- les Nickel et
- les Lithium.

Les batteries sont caractérisées par deux éléments :

- par une tension nominale en charge
- la capacité C_{batt} en Ah.

Deux principaux critères permettent de juger si elles sont adaptées à l'application recherchée :

- leur durée de vie ;
- leur énergie spécifique.

A) La batterie Plomb-acide

La batterie Plomb-acide est le plus ancien type de stockage électrochimique rechargeable, inventée en 1859 par le physicien Gaston Planté. Elle bénéficie d'une grande maturité technologique et est peu chère, ce qui en fait une solution toujours attractive. Elle est caractérisée par une tension de pleine charge de 2,1V et une de fin de décharge autour de 1,85V. Enfin, son énergie spécifique, bien que pouvant atteindre les 170 Wh/kg en théorie, est en pratique de l'ordre de 40 Wh/kg, ce qui rend ce type de batteries peu maniables comparées à certaines technologies plus récentes.

B) La batterie Nickel-Cadmium

La batterie Nickel-Cadmium a été brevetée en 1899. Cette technologie ancienne possède une énergie spécifique faible, entre 45 et 85 Wh/kg, et surtout utilise des matériaux polluants. Une alternative plus récente lui est donc préférable, la batterie Nickel-Hydrure Métallique. Commercialisée depuis les années 1990, elle utilise des électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en hydrure métallique, moins polluant que le cadmium, ainsi que de la potasse pour électrolyte.

C) La batterie Lithium-ion (Li-Ion)

La batterie Lithium-ion (Li-Ion) est une technologie récente de très haute densité énergétique, de faible auto-décharge et d'absence de besoin de maintenance.

3.4.1.3 Schéma électrique équivalent

Le modèle de la batterie simplifié est constitué d'une source de tension équivalente V_B en série avec une résistance R_b (Figure 3.9).

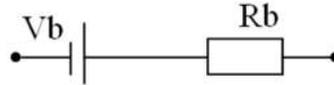


Fig 3.9 Schéma électrique équivalent de la batterie

3.4.1.4 Modèle de la capacité

A) Capacité Nominale

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie C_N en Ah que peut restituer la batterie en fonction de la demande journalière (E_{ch}), du nombre de jours d'autonomie (N_a), de la profondeur de décharge maximale de la batterie (P_{Dm}) et du facteur de correction de la température (η_t), pour une tension de la batterie donnée (U_b).

$$C_N = \frac{E_{ch} \times N_a}{U_B \times P_{Dm} \times \tau_t} \quad (3.11)$$

La capacité C_N sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie (EDC). Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie (Q_d).

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (3.12a)$$

L'évolution temporelle de Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie (croît en décharge, décroît en recharge, en convention récepteur). Elle est donnée par :

$$Q_d = I_{bat} \times t \quad (3.12b)$$

B) Capacité de la batterie en charge/décharge

Lorsque la production totale du système hybride est supérieure à la demande en énergie, le système de stockage est en état de charge. Sinon il est en état de décharge. La quantité de charge de la batterie à l'instant t peut être calculée en utilisant l'équation (3.13a).

$$E_B(t) = E_B(t-1) \times (1 - \sigma) + \left(\frac{E_{GA}(t) - E_L(t)}{\tau_{inv}} \right) \times \tau_{bat} \quad (3.13a)$$

Où

$E_B(t)$ et $E_B(t-1)$ sont les quantités de charge des batteries à l'instant t et $(t-1)$, $E_{GA}(t)$ est l'énergie totale générée par la source d'énergie renouvelable, après la perte d'énergie dans le contrôleur, $E_L(t)$ est la demande de la charge à l'instant t , η_{inv} et η_{bat} sont le rendement de l'onduleur et celui de la charge de la batterie, σ est le taux d'autodécharge qui dépend de la charge accumulée et l'état de la batterie. La quantité de charge de la batterie est soumise à des contraintes telles que:

$$E_{B_{min}} \leq E_B(t) \leq E_{B_{max}} \quad (3.13b)$$

Avec

$E_{B_{max}}$ et $E_{B_{min}}$ sont la quantité de charge maximale et minimale de la batterie.

3.4.2. Supercondensateurs

3.4.2.1 Description

Les supercondensateurs sont des moyens de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Elles s'apparentent à des condensateurs possédant une très grande capacité. Selon le même principe que les batteries, un supercondensateur est composé d'un électrolyte séparant deux électrodes conçues dans un matériau poreux, comme le charbon actif, afin d'en démultiplier la surface spécifique.

3.4.2.2 Les caractéristiques

Selon les composants chimiques employés dans sa conception, un supercondensateur peut faire quelques farads à quelques milliers de farads. Il peut par ailleurs être caractérisé par les mêmes paramètres que les batteries, comme la tension nominale à pleine charge. Ainsi, les supercondensateurs peuvent emmagasiner une énergie spécifique allant du dixième à la dizaine de Wh/kg, ce qui est très faible devant celles des batteries, mais en contrepartie possède une puissance spécifique allant de 1 à 100 kW/kg, là où les batteries sont limitées à une centaine de W/kg pour la Plomb-acide et à autour de 300 w/kg pour la Lithium-Ion.

3.4.2.3 Complémentarité du supercondensateurs et batteries

Supercondensateurs et batteries sont donc très complémentaires : le premier peut grâce à sa grande puissance spécifique servir dans les systèmes en sites isolés de stockage tampon à court terme lorsque les pics de production ne coïncident pas avec ceux de consommation, tandis que les seconds sont capables à plus long terme d'assurer l'autonomie du site sur quelques heures ou quelques jours sur une période de faible production des sources.

3.4.2.4 Modélisation

A) Modèle simplifié

Le banc de supercondensateur est un ensemble d'éléments supercondensateur mis en série équivalent à un circuit RC dont le modèle simplifié d'un supercondensateur est composé d'une capacité et d'une résistance comme le montre la figure 3.10a et 3.10b.

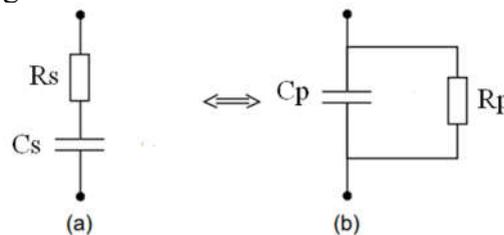


Figure 3.10 Modélisation d'un supercondensateur
 a) Capacité avec une résistance série,
 (b) Capacité avec une résistance parallèle

B) Charge et décharge

La charge et la décharge d'un supercondensateur en fonction du temps sont donnés par les équations suivantes :

$$V_{Sc_{charge}}(t) = V_{Sc_{max}} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{sc}}}\right) \quad (3.14a)$$

$$V_{Sc_{decharge}}(t) = \left(e^{-\frac{t}{\tau_{sc}}}\right) \quad (3.14b)$$

Où

τ_{sc} est la constante de temps, donnée par :

$$\tau_{sc} = R_{SSC} \times C_{SSC} \quad (3.14c)$$

$V_{sc_{max}}$ est la tension maximale.

3.5 Système PV avec groupe électrogène et stockage hybride (batterie/supercondensateur)

3.5.1 Présentation du système

Le système est présenté sur la figure 3.11. Il est composé d'une source PV, d'une source d'appoint (groupe diesel) et d'un système de stockage hybride (batterie et supercondensateur).

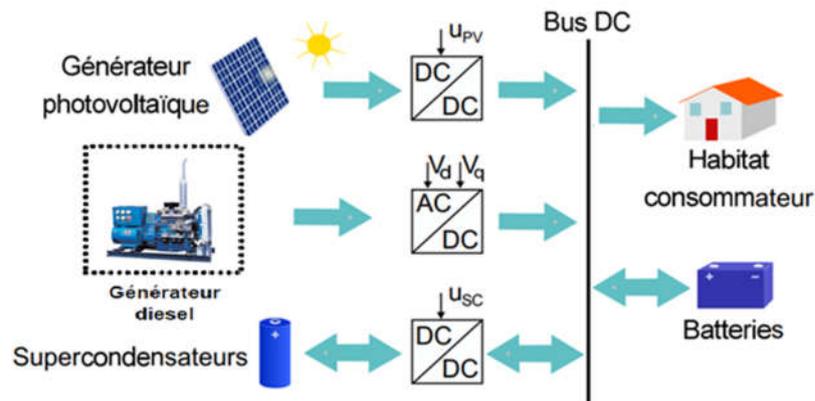


Figure 3.11 Composition du système

3.5.2 Profil de charge

La courbe de charge typique d'un village rural est habituellement composée (figure 3.12):

- d'une pointe significative en soirée, qui correspond principalement aux usages d'éclairage. La puissance de pointe le soir est deux à cinq fois plus élevée que la plus forte puissance appelée en période de base;
- d'une demande importante le matin et l'après-midi et
- d'une base. La base concerne généralement les premières heures du jour, mais peut parfois inclure une consommation nocturne. La demande énergétique nocturne est assez limitée dans les zones rurales (ou même inexistante dans les petits villages) : la puissance appelée est donc d'ordinaire très basse la nuit, comparée aux pointes du soir et de la mi-journée.

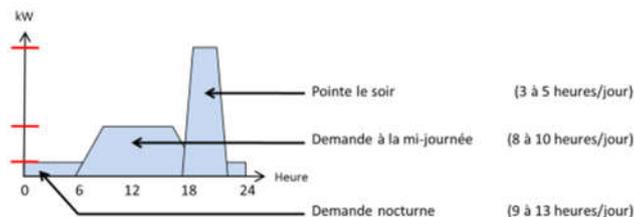


Figure 3.12 Profil de charge

3.5.3 Position du problème

Pour ce type de profil, nous avons deux problèmes :

- les variations instantanées de la puissance durant le jour ;
- La pointe significative en soirée, qui correspond principalement aux usages d'éclairage.

La batterie ne peut pas répondre à ces besoins sans que sa taille ou sa durée de vie sera affectée.

Le premier problème est résolu en utilisant les supercondensateurs, tandis que le deuxième sera résolu par l'utilisation du groupe diesel. Car le groupe diesel peut être utilisé pour alimenter une charge pour quelques heures et ne peut pas être utilisé pour des périodes longues et surtout à faibles charges.

3.5.4 Fonctionnement du système

Le fonctionnement du système est réparti en trois modes :

- **mode un**

Il porte sur l'alimentation de la charge en présence de l'énergie solaire. L'alimentation est faite par le PV, les supercondensateurs en cas des pics de puissance et les batteries en cas d'insuffisance de l'énergie solaire (passage des nuages). L'excès d'énergie est utilisé pour la charge des batteries et les supercondensateurs.

- **mode deux**

L'alimentation de la charge durant les heures de pointes le soir est faite par le groupe diesel. Comme le groupe peut être utilisé pour la recharge complète des batteries si nécessaire.

- *mode trois*

L'alimentation de la charge durant la nuit (hors des heures de pointes) est faite par les batteries.

3.5.5 Application

On montre dans la figure 3.13 un système hybride composé d'un groupe électrogène diesel de 55 kVA, un système PV de 16 kWc et un parc de batteries de 150 kWh, pour une demande électrique quotidienne de 140 kWh.

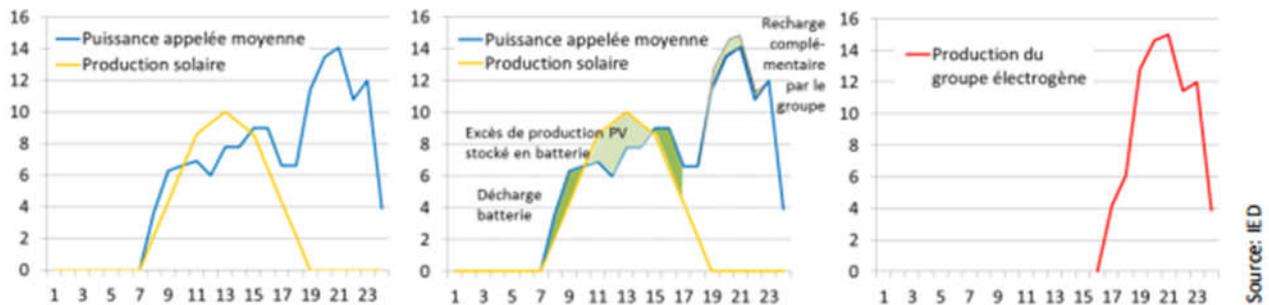


Figure 3.13 Différentes puissances mises en jeu

L'hybridation réduit la consommation de carburant, améliore les performances du groupe (car ses périodes d'utilisation à faible charge sont diminuées) et réduit sa durée journalière d'usage, ce qui accroît sa durée de vie.

Bibliographie

- [1] Lila Croci, Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs, Automatique. Université de Poitiers, France, 2013
- [2] Olivier Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur, Energie électrique. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2002. France. <tel-00439079>.
- [3] M. Dario Morale S, Sujet, Optimalité des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Paris XI Orsay, France, 2006.
- [4] Yaël Thiaux, Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides – Evaluation de la technologie Li-ion, Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010. France.
- [5] Brahim Abdallah Brahim, Etude des différentes configurations des systèmes d'énergie hybrides pv/diesel et de leur impact sur le cout de production d'électricité, Mémoire pour l'obtention du master d'ingénierie en eau et environnement, option: Energie et Procédés Industriels, Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durable, 2013, France.
- [6] Grégoire Léna (IED), Mini-réseaux hybrides PV-diesel pour l'électrification rurale, Tâche 9 de l'AIE-PVPS, Sous-Tâche 4, Rapport AEI-PVPS T9-13:2013 CLUB-ER, Publication Thématique Juillet 2013.
- [7]. Ludmil Stoyanov, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2011. France.
- [8] Mohamed Mladjao Mouhammad Al Anfaf, Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges, université de Lorraine, France, 2016.