



Etude Comparative des Différentes Techniques de Stockage de l'Energie Photovoltaïque

R. Kabouche^{#1}, S. Harrouni^{#2}, A. Talha^{#3}

[#]Laboratoire d'instrumentation, Faculté d'électronique et d'informatique
Université Houari Boumedienne, Algérie

¹rkabouche@usthb.dz

²sharrouni@yahoo.fr

³abtalha@gmail.com

Résumé— Les énergies renouvelables désignent l'ensemble des techniques de production d'énergie dont la mise en œuvre n'entraîne pas l'extinction de la ressource initiale et est renouvelable en permanence à l'échelle humaine. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre ni de déchets ni d'émissions polluantes. Néanmoins, ces énergies (en particulier le photovoltaïque et l'éolien) présentent un inconvénient majeur : elles fluctuent indépendamment de la demande, ce qui nécessite l'utilisation d'un dispositif de stockage, qui dépend de la nature des besoins et du type d'applications. Plusieurs techniques de stockage existent, certaines sont déjà largement exploitées (batteries, accumulation par pompage hydraulique, volant d'inertie), d'autres sont relativement récentes (supercondensateurs, bobine à supraconducteurs, pile à combustible). Ce document présente en premier lieu l'énergie photovoltaïque suivi d'une étude des différentes techniques de stockage de l'énergie électrique. Une étude comparative de ces techniques (capacité, efficacité, durée de vie, coût,...) est présentée en prenant cas par cas les champs d'application de l'énergie photovoltaïque. Cette étude nous a permis d'identifier les techniques de stockage les plus adaptées et les plus complémentaires pour une même application.

Mot- clés— Energie photovoltaïque, stockage d'énergie, batteries, supercondensateur, station de transfert d'énergie par pompage (STEP), volant d'inertie, critères de comparaison

I.

INTRODUCTION

L'énergie est une entité multiforme qui peut se transformer sous de très divers aspects. Toutefois, les énergies primaires directement accessibles dans la nature sont en nombre limité: ce sont les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie, énergie des marées) [1].

Dans la nature, l'énergie la plus abondante est l'énergie solaire. Chaque année l'énergie reçue représente 15000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Cela place théoriquement l'énergie électrique photovoltaïque et l'énergie solaire thermique parmi les plus disposées à intervenir massivement dans le bilan énergétique mondial.

Le gisement solaire algérien est parmi le plus abondant au monde, il dépasse les 5 millions de TWh/an, la durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). Le tableau 1 présente le potentiel solaire en Algérie [2].

En 2011, le gouvernement algérien a opté pour un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Ce programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030, ce qui représentera 40% de la production nationale d'électricité [2]. La figure 1 représente l'évolution de la part des énergies renouvelables en TWh et le taux de pénétration en %.

TABEAU I
POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE

Région	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie en %	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Pour l'énergie photovoltaïque le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Ces chiffres sont énormes, et lèvent donc un grand défi pour les secteurs industriel et économique, mais aussi pour le secteur de la recherche et développement qui aura pour missions entre autres l'identification des moyens techniques pour palier au caractère intermittent des sources renouvelables.

Dans cet article nous nous intéressons à l'énergie photovoltaïque et les différentes techniques de stockage pour chaque type d'application, dans le but d'une meilleure pénétration de cette forme d'énergie dans le bilan énergétique national.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012

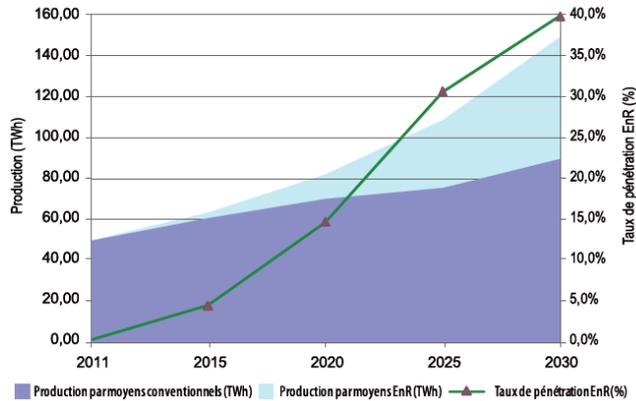


Fig. 1 Taux de pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale.

II. L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

A. Cellule, Générateur et Système Photovoltaïque

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçue à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule photovoltaïque (PV) de fonctionner comme un générateur. La valeur du courant est de la tension délivrés dépendent fortement de l'éclairement (donné en W/m^2), comme le montre la fig. 2

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque [3], [4].

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ou de plusieurs panneaux PV. Un système PV est un système permettant l'alimentation d'une charge ou d'un réseau électrique en utilisant des générateurs photovoltaïques.

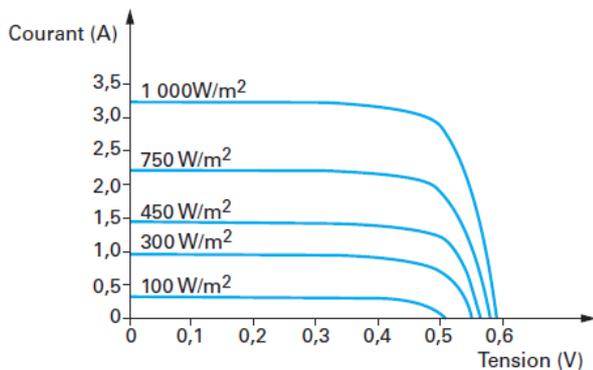


Fig. 2 Courant débité et tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque

B. Champs d'Applications des Systèmes PV et Intérêt du Stockage

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans des applications multiples et diversifiées qui peuvent être groupées en deux grandes catégories : applications connectées au réseau ou en site isolé (système autonome) [5], [6].

1) *Les Applications en Site Isolé*: Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles (ne dépassant pas 100 kW) qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution.

Un système photovoltaïque (PV) autonome, comme le montre la figure 3, est composé dans son ensemble d'un:

- Générateur photovoltaïque (panneaux photovoltaïques),
- Moyen de stockage : généralement électrochimique (batteries),
- Bloc de transformation réalisant plusieurs fonctions; convertisseur continu/continu permettant d'alimenter le bus continu, élévateur de tension pour la conversion continu/alternative permettant d'alimenter les charges alternatives,
- Module de contrôle et de mesure pour la charge des batteries et l'acquisition des différentes grandeurs physiques ainsi que le système de poursuite du point de puissance maximum.

2) *Les Applications Connectées au Réseau*: les systèmes PV connectés au réseau disposent, en plus des systèmes autonomes de la fig. 3, d'un compteur électrique réversible permettant la circulation du flux énergétique entre la source PV et le réseau électrique dans les deux sens. Deux types de réseaux électriques peuvent être distingués ;

- les réseaux interconnectés : L'implantation de champs PV dans le réseau interconnecté peut se faire sans besoin particulier de stockage. Le réseau assure la fourniture à l'utilisateur en cas de déficit de la production photovoltaïque. L'excédent peut être réinjecté sur le réseau et racheté.

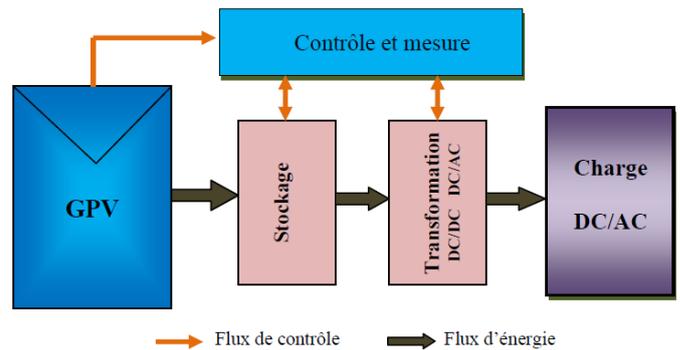


Fig. 3 Schéma fonctionnel d'un système PV autonome

- Les mini-réseaux ou réseaux isolés : Les réseaux isolés (par exemple les centrales diesel Sonelgaz situées au sud du



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



pays) sont composés d'unités de production d'électricité (principalement des générateurs diesel) dont la puissance est comprise entre quelques centaines de kW et quelques dizaines de MW. Cependant, l'intégration de générateurs photovoltaïques s'est fortement répandue ces dernières années. Malheureusement la pénétration des sources renouvelables est limitée pour éviter tout risque de déséquilibre dû à l'intermittence de la source.

III. STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Le stockage de l'énergie électrique passe le plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) que l'on accumule, puis transforme à nouveau en électricité. Seules l'énergie électrostatique avec les condensateurs ou supercondensateurs et l'énergie électrodynamique avec le stockage magnétique supraconducteur, font quelque peu exception en stockant des charges électriques statiques ou en mouvement, ils représentent un stockage direct de l'énergie électrique [5], [6].

A. Classification des moyens de Stockage

Les différents moyens de stockage peuvent être classés soit : [5], [6]

- Par la nature de l'énergie intermédiaire : elle peut être gravitaire, thermique, Le Tableau II donne les différentes formes d'énergies intermédiaires.
- Par la quantité de l'énergie stockée : petite ou grande échelle. Le stockage à petite échelle (de quelques centaines de W à quelques kW) est particulièrement destiné à répondre à des applications stationnaires (alimentation électrique sans coupure possible, stockage pour pallier localement l'intermittence d'une source d'énergie renouvelable) ou des applications mobiles (transports, télécommunication...). Le stockage à grande échelle (de quelques dizaines de kW à quelques centaines MW) est destiné à un fonctionnement au niveau du réseau ou de systèmes de production intermittente de «grande puissance» : éoliens, photovoltaïques, centrales solaires.
- Par la mobilité du moyen de stockage : embarqué ou stationnaire. Le stockage embarqué est utilisé principalement dans les moyens de transport (automobile, train, avion ou navire) ou dans les appareils électroniques autonomes (les PC-portables, les téléphones portables, caméscopes,). Dans les systèmes stationnaires la quantité d'énergie stockée est très importante et assure plusieurs fonctions : compensation d'une insuffisance due à l'intermittence de l'offre, pallier à une

déficience dans la fourniture d'énergie, récupérer et stocker un excédant de fourniture d'énergie.

TABLEAU III
FORMES D'ÉNERGIE INTERMÉDIAIRES DE STOCKAGE

Énergie intermédiaire	Systèmes de stockage
Gravitaire	Pompage hydraulique
Thermique	Stockage de chaleur latente ou sensible avant production électrique
De pression	Compression d'air
Chimique	Batterie d'accumulateurs électrochimique
	Stockage H ₂ par électrolyse et pile à combustible
Cinétique	Volant d'inertie
Electromagnétique	Courant permanent à bobine supraconductrice
Electrostatique	Condensateur classique
	Supercondensateur à électrolyte double couche

- Par la durée du stockage : court ou long terme. La durée représente le temps nécessaire pour accomplir un cycle de stockage-déstockage.

Dans cet article nous nous intéressons au stockage de l'énergie photovoltaïque, cette énergie est par nature fluctuante par journée (jour/nuit) et à long terme (été/hiver). De ce fait, nous adoptons la classification par critère de la durée de stockage pour présenter les techniques de stockage les plus utilisées mais nous présenterons également des techniques nouvelles et émergentes tel que le stockage par centrale hydropneumatique.

B. Stockage Court Terme

Le stockage court terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage-déstockage est comprise entre quelques fractions de seconde et quelques heures.

1) *Les Accumulateurs* : Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ils restituent sous forme d'énergie électrique l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un ensemble de cellules élémentaires rechargeables. Les batteries, représentant le moyen de stockage le plus connu par le grand public, sont très variées et occupent un champ d'applications très vaste. Le tableau III, donne une comparaison entre les types les plus utilisés [7].



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



TABLEAU IIIII
COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES

Type	Energie massique (Wh/kg)	Rendement (%)	Coût €/kWh	Durée de vie (Nb de recharges)	Autodécharge/mois (%)
Pb-acid	30-50	60-98	50-200	400-800	5
Ni-Cd	45-80	60-80	200-600	1500-2000	> 20
Na-S	75-120	> 80	100-250	4500	-
Li-ion	90-180	90-100	700-1000	500-1000	10
Redox-flow	25-35	> 80	7-100	>10000	-

Nous noterons que les batteries Na-S (Sodium-soufre) peuvent présenter des puissances très élevées, ce qui les classe parmi les batteries à flow, par exemple au Japon une installation comportant 40 unités de 2MW est installée en janvier 2012 permettant de stocker en six heures jusqu'à 480 MWh en heures creuses pour les revendre en heures de pointe.

Les batteries Redox-flow ou batterie à circulation d'électrolyte sont différentes des autres batteries du fait qu'elles permettent de contourner la limitation des accumulateurs électrochimiques classiques dans lesquels les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés sur les électrodes où ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est limitée, ce qui fixe un maximum à la capacité. Dans les batteries à circulation d'électrolyte, les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. Ce dernier est pompé vers des réservoirs externes dont le volume représente l'énergie stockée. Des systèmes de capacité élevée sont installés dans le monde (200kW-800kWh, 250kW-2MWh, 1 5MW, 275kW, ...).

2) *Les Supercondensateurs* : Nous distinguerons d'abord deux familles principales, les supercondensateurs de type électrostatique, dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques; et les supercondensateurs de type électrochimique, dans lesquels interviennent des processus faradiques réversibles, semblables à ceux des accumulateurs électrochimiques. Les supercondensateurs électrostatiques stockent les charges électriques en exploitant d'une part, le concept fondamental en électrochimie, de double couche électrochimique à l'interface entre un conducteur électronique (électrode) et un conducteur ionique (électrolyte) (Fig. 4); d'autre part, l'aptitude de certains matériaux à conduction électronique, tels que le carbone activé, à développer des surfaces spécifiques extrêmement élevées (jusqu'à 2 000 à 3 000 m²/g) [8].

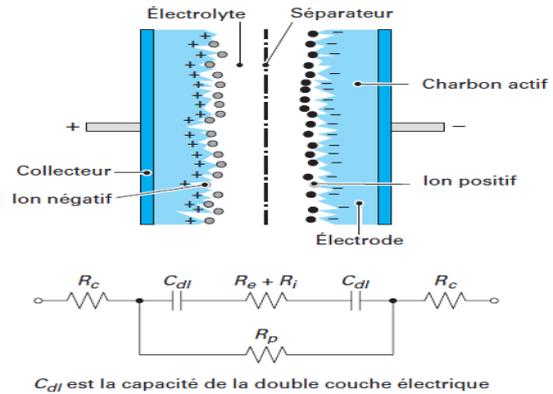


Fig. 4 Structure d'un supercondensateur avec localisation des résistances

La tension d'utilisation est impérativement de 1,2 V dans le cas d'un électrolyte aqueux et de 2,3 à 2,85 V dans le cas d'un électrolyte organique. Les supercondensateurs peuvent avoir des valeurs de capacité comprise entre 0,1 et 5000 F, ceci permet de les considérer comme des éléments potentiels de stockage d'appoint généralement associés à une autre source principale (Fig. 5). De plus ils ont une fiabilité élevée (plus de 20 ans) et une efficacité de 95%.

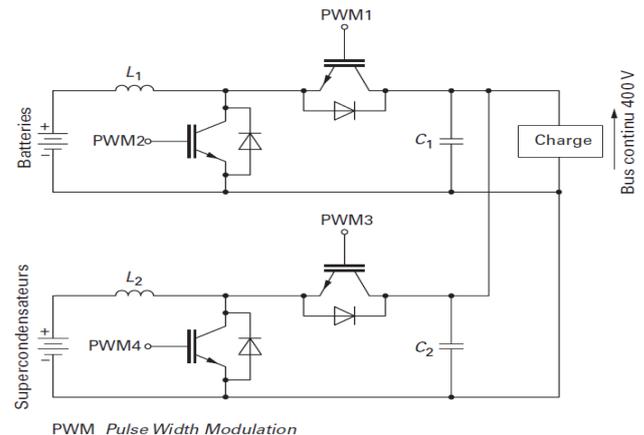


Fig. 5 Schéma de principe d'une alimentation hybride

3) *Volant d'Inertie*: un volant d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage) est couplé mécaniquement à un convertisseur électromagnétique qui permet la transformation réversible d'énergie électrique en énergie mécanique, (Fig. 6). Le moteur/générateur est l'interface électromécanique permettant la charge et la décharge [9].

Un corps solide de moment d'inertie I , tournant à la vitesse angulaire ω autour d'un axe passant par son centre de gravité possède une quantité d'énergie cinétique E_c de valeur :

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$



On montre facilement que l'énergie cinétique stockable par unité de masse m est de la forme :

$$E_c/m = A \sigma \quad (2)$$

Avec :

- A nombre sans dimension qui dépend de la forme du solide en rotation
- σ la contrainte maximale admissible liée aux efforts centrifuges.
- ρ la masse volumique du matériau constituant le mobile.

Les systèmes de stockage d'énergie par volant d'inertie sont constitués d'un cylindre rotatif massif, supporté (dans les systèmes modernes) par lévitation magnétique, couplé à un moteur/générateur. La maintenance de tels systèmes est légère et leur durée de vie importante (supérieure à 20 ans). Les puissances sont proches de 5 à 25 Wh/kg. La puissance impulsionnelle de ces dispositifs peut être élevée : 2 kW/kg avec une durée de décharge de l'ordre de la minute. Mais ils représentent une cyclabilité très élevée (jusqu'à 100000).

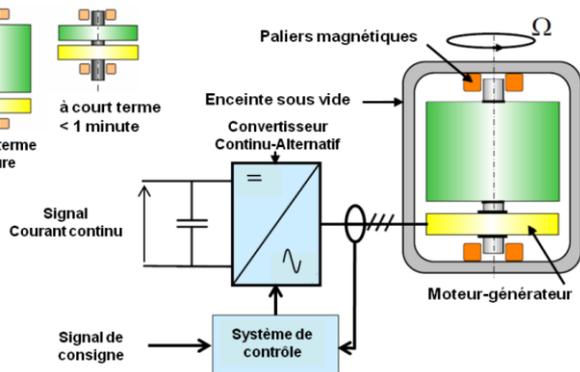


Fig. 6 Principe d'un système à volant d'inertie

Les premières applications furent dans les transports (bus et tramways pour récupérer l'énergie de freinage). Depuis quelques années, des volants d'inertie équipent des alimentations in-interruptibles dans lesquelles ils concurrencent les batteries électrochimiques au plomb et au nickel-cadmium. Dans le cas d'applications stationnaires et pour raison de sécurité, l'installation est généralement enterrée afin de prévenir l'éclatement éventuel du volant.

4) *Stockage Magnétique par Supraconducteur (SMES pour Supraconducting Magnetic Energy Storage)* : L'électricité est stockée de manière directe sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu dans un anneau supraconducteur fonctionnant au dessous de sa température critique (environ 4 K), et donc sans pertes par effet joule. La fig. 7 montre la variation de la résistivité de quelques matériaux en fonction de la température [10].

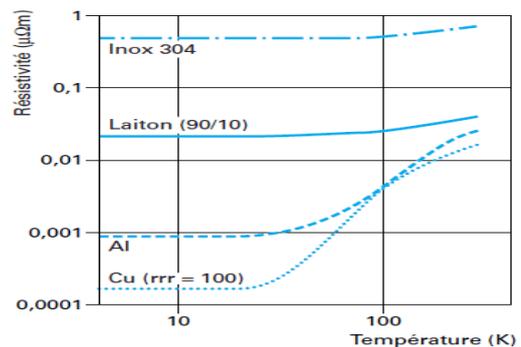


Fig. 7 Évolution de résistivités avec la température

Comme le montre la fig. 8, un système SMES est composé de trois parties : la bobine supraconductrice, un circuit de conditionnement de la puissance et un réfrigérateur cryogénique. Les SMES sont particulièrement utilisés pour protéger certaines charges sensibles contre les creux de tension. Les atouts de cette technologie résident dans son excellente cyclabilité, sa durée de vie importante (20 à 30 ans), de très bons rendements (95%) et des densités de puissance élevées. L'inconvénient majeur est celui de l'environnement cryogénique associé qui nécessiterait une exploitation nouvelle sur les réseaux d'énergie.

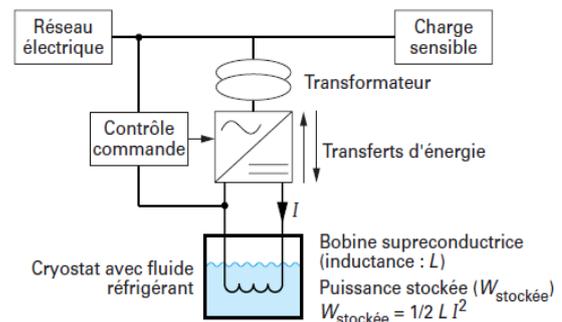


Fig. 8 Principe d'un SMES pour l'alimentation non interrompible

C. Stockage Long Terme

Le stockage long terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage-déstockage est comprise entre quelques heures à plusieurs jours voir quelque mois.

1) *Stockage gravitaire hydraulique*: Ce type de stockage est assuré par des Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) ou PHS (pour Pumped Hydro Storage). Le principe en est l'accumulation d'énergie sous forme gravitaire. Le travail W fourni par une masse de 1 kg qui tombe de 1 mètre est égale à 1 joule. En kilowattheures le calcul se fait suivant la formule 3, [5] :

$$W = (m \cdot g \cdot h)/36 \quad (3)$$

Avec : $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$



h : hauteur en mètre

m : masse de l'eau en tonne

En fonction du débit d'eau turbiné et de la hauteur de chute, nous pouvons distinguer trois types de centrales hydrauliques [11]:

- la petite centrale hydraulique (puissance allant de 0,5 à 10 mégawatts),
- la microcentrale (de 20 à 500 kilowatts),
- et la pico-centrale (moins de 20 kilowatts).

Si l'on veut stocker de l'énergie électrique, il faut utiliser des STEP qui permettent de pomper et de turbiner de façon cyclique la même eau entre un bassin supérieur et un bassin inférieur, fig. 9. Leur principe général est bien connu : on pompe en utilisant l'énergie électrique bon marché d'heures creuses, puis on turbine pour produire de l'électricité d'une valeur plus élevée aux heures de pointe.

Actuellement (en 2011) Plus de 100 GW sont installés, répartis sur environ 380 ouvrages qui couvrent plus de 99% des capacités totales de stockage d'électricité. Ce taux est appelé à baisser du fait de la diversification des moyens de stockage. Les STEP permettent de constituer des stockages à grande échelle, à des coûts relativement faibles. Leur principal inconvénient est la nécessité de trouver un site géographique adapté, réunissant deux bassins superposés, ce qui rend (en Europe) la construction de nouvelles STEP de plus en plus difficile et coûteuse. Et pour palier à cet obstacle, des axes de recherche sont orientés actuellement vers une technique innovante, le stockage hydropneumatique, qui sera présenté plus loin.

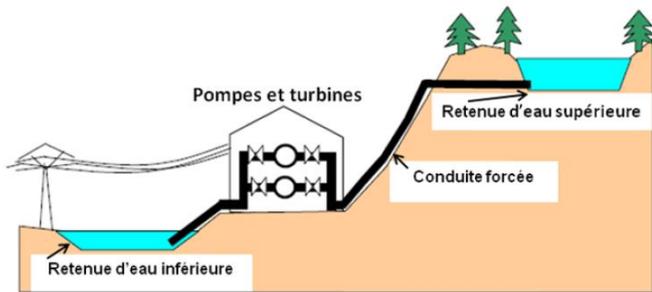


Fig. 9 Stockage gravitaire hydraulique par STEP

2) *Stockage d'hydrogène, Pile à combustible*: Depuis plusieurs années, l'hydrogène est considéré comme le vecteur énergétique d'avenir pour les transports, mais également pour d'autres applications stationnaires. L'hydrogène est l'atome le plus petit, le plus léger et le plus répandu dans l'univers. On le trouve partout, de la molécule d'eau aux hydrocarbures, en passant par tous les organismes vivants. De plus, à masse égale, il libère trois fois plus d'énergie que l'essence. Il pourrait ainsi être utilisé directement (combustion classique) ou en utilisant des « piles à combustible » qui le convertiraient

en électricité et en chaleur. Le principe de la pile à combustible (PAC) est relativement simple : produire simultanément de l'électricité et de la chaleur en recombinaison de l'oxygène et de l'hydrogène, avec de l'eau pour seul rejet, fig. 10, [10].

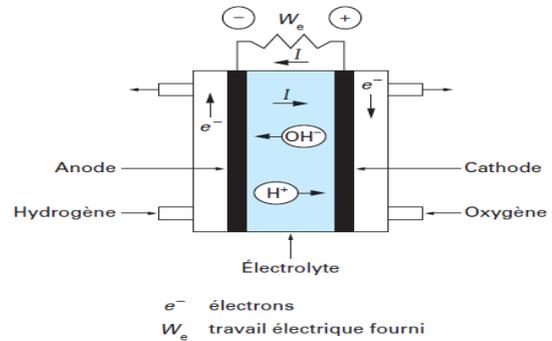


Fig. 10 Schéma de principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène

Il existe plusieurs types de piles à combustible qui se différencient par leur électrolyte, l'élément chargé de véhiculer les ions. Cet électrolyte définit la température de fonctionnement de la pile et, de fait, son application. Le tableau IV donne les plus importants types de pile à combustible, leur rendement, leur température de fonctionnement et leurs domaines d'application [6].

TABLEAU IVV
COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES

Description	Puiss. (kW)	Temp. de fonct. °C	Rendement électrique	Domaine
AFC – PAC alcaline	10 à 100	60 à 90	pile : 60-70 % Syst. : 62 %	Portable, transport
PEMFC – PAC à membrane d'échange de protons	0,1 à 500	60 à 100	pile : 50-70 % Syst. : 30-50 %	portable, transport, stationnaire
DMFC – PAC à méthanol direct	mW à 100	90 à 120	pile : 20–30 %	transport, stationnaire
PAFC – PAC à acide phosphorique	jusqu'à 10 ⁴	≈ 200	pile : 55 % Syst. : 40 %	transport, stationnaire
MCFC – PAC à carbonate fondu	jusqu'à 10 ⁵	≈ 650	pile : 55 % Syst. : 47 %	stationnaire
SOFC – PAC à oxyde solide	jusqu'à 10 ⁵	800 à 1 050	pile : 60–65 % Syst. : 55–60 %	stationnaire

Les PAC couvrent une très large gamme de puissance (de quelque mW à plusieurs dizaines de MW), cela permettra d'élargir considérablement leur champ d'applications. Mais leur pénétration dans le marché est fortement limitée par leur coût et les difficultés techniques de la production et du stockage de l'hydrogène [5], [6], [10].



3) *Stockage de chaleur* : Le stockage de l'énergie électrique sous forme thermique combine les étapes suivantes [6] :

- Durant la phase de stockage l'électricité est utilisée pour entrainer une pompe à chaleur qui transfère de la chaleur d'une enceinte vers une autre à température élevée.
- Durant la phase de déstockage, la chaleur est transformée à nouveau en énergie mécanique par une machine thermique.

L'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie thermique dans des matériaux réfractaire poreux contenus dans des enceintes thermiquement isolées (Fig. 11).

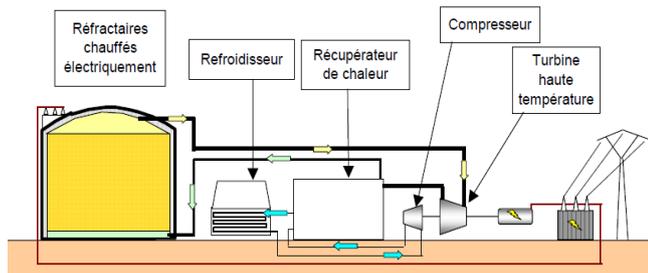


Fig. 11 Schéma de principe d'une installation de stockage thermique

À titre d'exemple, un réservoir de stockage thermique dimensionné pour 1000 MWh ne mesurerait que 20 m de diamètre et 20 m de hauteur, soit un volume de 5000 m³, avec un rendement global du stockage qui peut atteindre les 70%.

4) *Stockage par air comprimé ou CAES (Compressed Air Energy Storage)* : L'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur (Fig. 12). L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur, des mines de sel par exemple. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une turbine à gaz. La première unité commerciale de 290 MW à Hundorf en Allemagne a été mise en route en 1978. En 1991 en Alabama a été mise en fonctionnement une installation de 110 MW. Une installation de 2,7 GW est prévue à Norton en Ohio en 2012 [6].

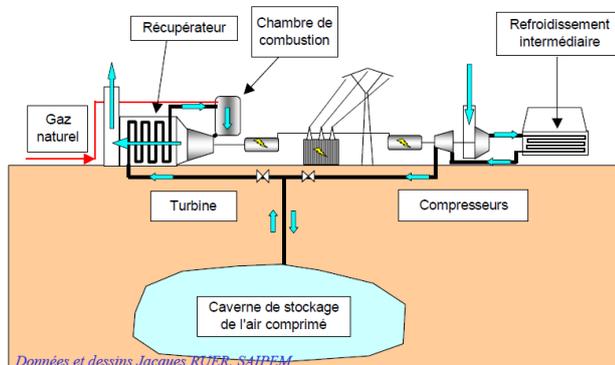


Fig. 12 Schéma de principe du stockage mécanique par air comprimé

5) *Stockage hydropneumatique* : C'est une nouvelle technique émergente qui est encore au stade de la recherche. Cette technologie se base sur l'extrapolation de l'énergie potentielle gravitaire de l'eau par la pression. Sachant que la pression atmosphérique est équivalente à une hauteur de 10 mètres, de ce fait, au lieu de pomper de l'eau à une hauteur de 300 mètres, on propose de la soumettre à une pression de 300 bars. Théoriquement le dispositif est très simple et présente de multiples avantages entre autres un bon rendement de cycle (on espère 75%), de plus les rendements des pompes et moteurs hydrauliques sont supérieurs à ceux des compresseurs.

IV. COMPARAISON DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE STOCKAGE :

Les technologies de stockage sont nombreuses, et la comparaison entre elles, est très délicate. Plusieurs paramètres peuvent intervenir en particulier la non maturité de certaines techniques par rapport à d'autres, comme par exemple les piles à combustibles et les supraconducteurs par rapport aux batteries ou au pompage hydraulique.

Néanmoins, nous allons retenir quelques critères les plus importants en particulier si ces techniques seront destinées pour le stockage de l'énergie photovoltaïque.

A. Critères de comparaison

Pour déterminer quelles sont les techniques de stockage les plus pertinentes pour un usage particulier, plusieurs facteurs doivent être pris en compte : La puissance disponible, la capacité de stockage, l'efficacité ou rendement (donné par le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée), la durée de vie en nombre de cycles ou en années, le coût, la maturité de la technique, ... [12]. Le tableau V présente quelques chiffres donnés à titre indicatif ainsi que les principales caractéristiques pour différentes techniques de stockage de l'énergie [5], [12].

La fig. 13 représente une comparaison de l'autonomie des différentes techniques en fonction de la puissance [13]. Nous constatons bien que le pompage hydraulique (STEP), les CAES, les batteries sodium-soufre (NaS) et les piles à combustible sont des moyens de stockage à très grandes autonomie avec des puissances très intéressantes pour les STEP et les CAES. Selon les sites ils peuvent garantir un stockage intersaisonnier.

B. Comparaison Cas par Cas

Le type de stockage optimal est intimement lié à la nature de l'application (embarquée ou stationnaire) et au type de production (centralisée ou décentralisée), cela nous a mené à faire une comparaison cas par cas. Pour chaque champ d'application de l'énergie photovoltaïque, nous allons identifier le moyen ou les moyens de stockage les plus adaptés.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



TABEAU V

COMPARAISON DE DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE

	Densité d'énergie en kW/m ³	Capacité en MWh	Puissance En MW	Efficacité	Durée de vie	Coût €/KWh	maturité
STEP	1 à 300 bars	1000-10000	100-2000	0,8	11000 cycles	Très faible	Elevée
CEAS	12 à 100 bars	1-200	15-200	0,5	11000 cycles	Faible	Moyenne
Thermique à turbine	200	1000-100000	10-100	0,6	-	Très faible	Prototype
Hydrogène et PAC	0,3 – 0,6	0,01-10000	001-1000	0,6	25 ans	Elevé	Moyenne
Flow Batterie	33	0,01-480	100	0,7	4000 cycles	Moyen	Moyenne
Batterie	20 – 120 KWh/Kg	0,01-1000	001-10	0,8	500-4000 cycles	Moyen-faible	Elevée
SMES	1 - 5 KWh/Kg	3.10 ⁻⁴ - 3.10 ⁻³	1-3	0,9	> 10000 cycles	Elevé	Moyenne
Volant d'inertie	1 - 5 KWh/Kg	0.5-10	2-40	0,8	> 10000 cycles	Moyen-élevé	Moyenne
Supercondensateur	5 – 10 KWh/Kg	Quelque KWh	-	0,9	> 10000 cycles	élevé	Moyenne

Selon les critères de comparaison et les performances de chaque type de stockage présentés précédemment, nous pouvons dégager les tendances générales suivantes :

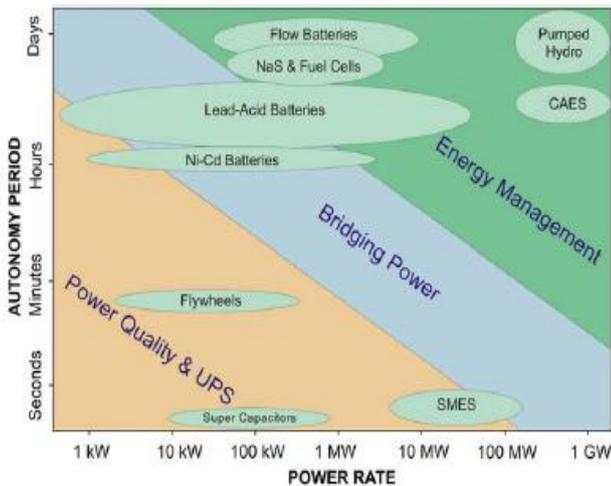


Fig. 13 l'autonomie des techniques de stockage en fonction de leur puissance.

1) *Applications en site isolé* : En site isolé les critères de choix les plus importants sont : faible autodécharge, autonomie élevée et une longue durée de vie. Pour de faibles puissances (inférieure à 100kW), les candidats favorisés sont les batteries Lithium-ion et plomb-acide. Pour les puissances plus élevées nous pouvons favoriser les batteries Redox-flow et les batteries Na-S vu leur durée de vie importante, presque le double d'une batterie au plomb au même prix que cette dernière. Si les charges alimentées sont exigeantes en courant pour le démarrage, nous pouvons associer un moyen à forte puissance tels que les

supercondensateurs, cela évitera le surdimensionnement des accumulateurs.

2) *Applications raccordées aux mini réseaux* : dans ces applications le générateur principal d'électricité est un (ou plusieurs) groupe électrogène (générateur diesel). L'introduction de l'énergie photovoltaïque en petite quantité pourrait ne pas perturber le fonctionnement du générateur diesel, mais économiquement ce n'est pas rentable. Une introduction massive de l'énergie PV pourrait déséquilibrer la production et causer des arrêts répétitifs du générateur diesel (en période de fort ensoleillement) ce qui pourrait l'endommager ou réduire sa durée de vie. Un système de stockage réduira ces difficultés et permettra de maximiser le pourcentage de l'énergie PV dans la production totale, et de ce fait réduire considérablement la consommation de carburant, du générateur diesel ce qui pourrait prolonger sa durée de vie. Les systèmes de stockage dans ce cas d'application doivent supporter des valeurs d'énergie moyennes mais fortement fluctuantes, et avoir des temps de réponse assez rapide (pour compenser le temps de démarrage des générateurs diesel). Les techniques de stockage qui répondent à ces exigences sont les batteries au plomb. Pour des puissances plus élevées, les batteries Redox, les batteries Na-S et les piles à combustible sont adaptées. Nous pouvons proposer, si le site est adapté, le stockage gravitaire (STEP) associée à des supercondensateur ou des volants d'inertie.

3) *Application dans le réseau interconnecté* : Dans ces applications, le rôle du stockage est multiple pouvant être groupé en ; report de production, lissage de pointe et la qualité de puissance. Le report de puissance fait appel à un stockage d'énergie très élevé (plusieurs centaines de MWh), le pompage d'eau, les batteries redox, les batteries Na-S sont les plus appropriés avec un avantage important pour le premier en termes de coût. Pour le lissage de pointes (quelques MW et une sollicitation quotidienne) au



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Gharđaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



niveau de poste de distribution, les batteries sont les plus favorisés. Pour le contrôle de la qualité de puissance, les critères essentiels sont la capacité de restitution de l'énergie et le cyclage. Les volants d'inertie, les supercondensateurs, les supraconducteurs sont les plus adaptés ainsi que les batteries lithium-ion.

V. CONCLUSION

Notre pays dispose d'un potentiel énergétique solaire énorme, mais son exploitation reste très limitée, à cause de la politique nationale en matière d'énergie et aussi au manque d'études statistiques et techniques pour la valorisation des énergies renouvelables. Aujourd'hui, la politique a changé et le programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique du gouvernement espère atteindre 40% d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique d'ici 2030. Ce chiffre est très grand, et connaissant la nature intermittente de l'énergie photovoltaïque et éolienne, le taux de pénétration de ces dernières dans le bilan énergétique ne pourra être réalisé sans des systèmes de stockage aussi grands que diversifiés.

C'est dans ce but que nous avons mené une étude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie photovoltaïque. Cette dernière est très abondante en tout point du globe, mais elle est intermittente sur une journée et sur l'année, ce qui nécessite son stockage. En effet, l'intérêt du stockage d'énergie est multiple, il permet une exploitation efficace et continue en sites isolés (en particulier les regroupements villageois dans le grand sud). Connectées au réseau de distribution, l'énergie photovoltaïque permet un soutien à ce dernier en quantité (pendant les heures de pointes) et en qualité (les défaillances du réseau). Cela signifiera une réduction des centrales thermiques d'appoint et par conséquent une réduction considérable des émissions de CO₂.

Notre étude nous a permis de montrer qu'il existe d'autres types de batteries qui peuvent concurrencer les batteries au plomb, tel que les batteries Na-S, Li-ion et les batteries redox. Le stockage par pompage d'eau en utilisant les STEP est une alternative à étudier, en particulier dans les sites qui disposent d'une source d'eau, et une géographie qui permet la réalisation des retenues d'eau (haute et basse).

Les supercondensateurs, le stockage par bobine supraconductrice, les volants d'inertie par contre sont l'alternative la plus appropriée pour le soutien du réseau pour un apport d'appoint, mais ils doivent d'abord arriver à maturité pour que leur exploitation soit optimale.

Les études comparatives sont très importantes pour la sélection préliminaire et pour la faisabilité technique et économique d'un système de stockage. Mais les étapes sur le terrain sont plus importantes et cruciales, donc nous

espérons la réalisation de prototype des techniques de stockage à grande échelle (STEP, centrale de stockage thermique à turbine, l'air comprimé, batterie redox), puisque ces techniques nécessitent (contrairement aux batteries classiques) un savoir faire multidisciplinaire donc un temps plus grand pour arriver à maturité dans notre pays. Nous estimons que ces techniques participeront massivement et efficacement à la pénétration des énergies renouvelables et du photovoltaïque en particulier dans le bilan énergétique national.

REFERENCES

- [1] P. Couffin et M. Perrin "Le stockage des énergies intermittentes". Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Clefs CEA (50-51), hiver 2004-2005. pp 136-138.
- [2] (2012) site du ministère des énergies et des mines. [en ligne]. Disponible : www.mem-algeria.org
- [3] A. Labouret et M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*, 4^{ème} éd, éditions Dunod, 2009.
- [4] J-C. Muller, *Electricité photovoltaïque*, Techniques de l'ingénieur, BE 8578, 2007 ;
- [5] A. Marquet, C. Levillain, A. Davriu, S. Laurent, P. Jaud, *Stockage d'électricité dans les systèmes électriques*, Techniques de l'ingénieur, D4030, 1998.
- [6] P. Odru, *Le stockage de l'énergie*, Edition UniverSciences, Dunod, Paris, 2010.
- [7] P. Mayé, *Générateurs électrochimiques*, Editions L'usine Nouvelle, Dunod, Paris, 2010.
- [8] H. Gualous, R. Gallay. *Application des supercondensateurs*, Technique de l'ingénieur, D3335, 2007
- [9] J. Kaut, J. Bonal et P. Odru, *Stockage inertiel de l'énergie*, Technique de l'ingénieur, D4030, 2007
- [10] Y. Brunet et P. Tixador, *Supraconducteurs-environnement et application*, Technique de l'ingénieur, D2703, 2004
- [11] D. Le Gourières, *Les petites centrales hydroélectriques : conception et calcul*, Edition Moulin Cardiou, 2009
- [12] L-M Jaquelin et I. Lallali-Benberim, *le stockage d'énergie : Enjeux et solutions techniques*, Disponible www.enea-consulting.com
- [13] Ibrahim H, Ilinca A, Peroon J. *Energy storage systems-characteristics and comparisions*. Renewable and sustainable energy reviews. Vol. 12, pp 1221-1250, 2008.