

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

**Comparaison et détermination des
dispositifs de stockage appropriés
pour un système photovoltaïque autonome
en zone sahélienne**

E. Korsaga, Z. Koalaga, D. Bonkougou, F. Zougmoré



ISSN : 2428-8500

DOI : [10.18145/jitipee.v4i1.161](https://doi.org/10.18145/jitipee.v4i1.161)

Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne

Eric Korsaga ⁽¹⁾, Zacharie Koalaga ⁽¹⁾, Dominique Bonkougou ⁽¹⁾, François Zougmoré ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Matériaux et Environnement, UFR.SEA, Université Ouaga 1 Prof. Joseph Ki-Zerbo, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso
ekorsaga@gmail.com

Résumé – Dans le contexte de changement climatique actuel, les énergies renouvelables en particulier l'énergie solaire photovoltaïque constituent une bonne alternative aux énergies conventionnelles. L'énergie solaire est une énergie non polluante, disponible sur l'ensemble du globe et aussi la ressource la mieux partagée sur terre. Toutefois, l'alternance jour/nuit provoquée par la rotation de la terre et les aléas climatiques causés par les orages et les passages nuageux limitent considérablement son utilisation de façon permanente.

Pour pallier cette insuffisance et assurer la continuité du service dans les systèmes photovoltaïques (PV), l'utilisation de dispositif de stockage d'énergie est nécessaire. Il existe différents types de stockage dont certains déjà utilisés et d'autres en développement.

Dans cet article, nous proposons d'examiner les principales caractéristiques des différentes techniques de stockage d'électricité et leur domaine d'application dans les systèmes PV en zone sahélienne (stockage permanent à long ou à court terme, puissance maximale requise, etc.).

Pour permettre le choix des dispositifs de stockage appropriés, nous avons développé une approche caractérisée par l'indice de performance que nous avons implémenté en utilisant des matrices élémentaires de décision et des matrices globales de décision. Les résultats obtenus montrent que la méthode proposée permet de déterminer les dispositifs appropriés pour chaque type d'application et selon les besoins de la charge.

Mots clés : Dispositif de stockage, solaire photovoltaïque, Système autonome, Indice de performance

DOI : 10.18145/jitipee.v4i1.161

Introduction

Le Burkina Faso dispose d'une multitude de ressources renouvelables (la biomasse, l'éolienne, l'hydraulique, le solaire PV, etc.). Toutefois, ces sources d'énergies sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel réel. Parmi toutes ces énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque offre le potentiel le plus important. En effet, le potentiel moyen en ce qui

concerne l'ensoleillement est estimé à $5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ pendant 3000 à 3500 heures par an [1].

Paradoxalement au taux d'ensoleillement élevé, le taux de la couverture en électricité est très faible surtout en zone rurale (moins de 10%) [2, 3]. La disparité entre les villes et les campagnes se justifie par les faibles revenus, la faible densité de la population rurale et accentuée par l'insuffisance des solutions énergétiques décentralisées [1].

De ce fait, le réel besoin en électricité exprimé par les populations a fait naître de nombreux "projets pilotes" étatiques comme privés, axés sur la promotion des énergies renouvelables qui sont bien adaptées à une production décentralisée d'électricité. Cependant, on constate que la majorité des installations photovoltaïques déjà existantes sont soit sous-exploitées, soit défectueuses. Cela est souvent dû au fait que le dispositif de stockage utilisé n'est pas adapté aux besoins de la charge ou aux conditions climatiques (températures élevées, aérosols, etc.).

Dans cet article, nous allons analyser et comparer les différentes technologies de stockage existantes afin d'identifier en fonction de la nature de l'application, des besoins de la charge et des conditions météorologiques, les technologies de stockage les mieux adaptées pour les systèmes PV autonomes en zone sahélienne. Plusieurs travaux ont été déjà menés dans ce sens : [4-10]. Mais, les comparaisons ont été faites de manière globale ou qualitative sans tenir compte de certains facteurs tels que le coût et la zone climatique [11]; qui sont des facteurs importants pour une technologie de stockage. Dans notre travail, nous effectuons une comparaison plus fine par le regroupement des applications autonomes en deux types : les applications autonomes à petite échelle (inférieure à 100 kWc) et les applications autonomes à moyenne échelle (supérieure ou égale à 100 kWc).

1. Modèles de dispositifs de stockage

Le stockage de l'énergie électrique est une opération qui consiste à placer une certaine quantité d'énergie dans un lieu donné pour en disposer lorsque la production sera interrompue ou insuffisante. Les techniques utilisées pour le stockage de l'énergie sont très nombreuses. Selon la nature du stockage, on peut distinguer le stockage direct et le stockage indirect comme indiqué sur la Figure 1.

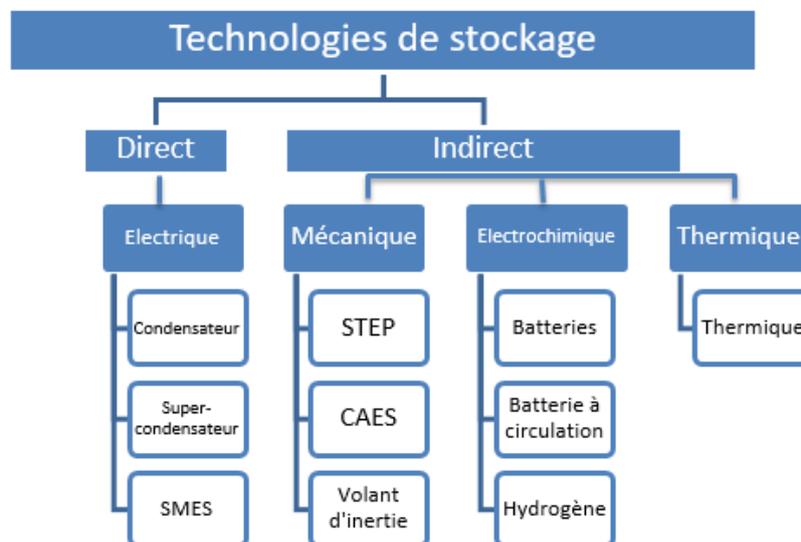


Figure 1 : Classification des dispositifs de stockage.

1.1. Stockage direct

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit : des condensateurs, des supercondensateurs et des inductances supraconductrices. Ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité.

a. Condensateur

Un condensateur est un composant de stockage électrostatique. La structure d'un condensateur est donnée par la Figure 2.

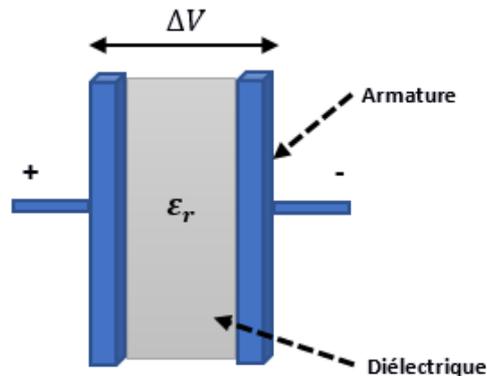


Figure 2. Structure d'un condensateur [12].

- Principe : le condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre deux électrodes séparées par un isolant diélectrique. En fonction de la nature des électrodes et de l'isolant, on peut distinguer plusieurs familles de condensateurs : le condensateur céramique, le condensateur électrochimique ou électrolytique et le condensateur à film plastique.
- Propriétés et applications : les condensateurs ont une capacité de stockage très faible (de 1 pF à 1 F), une densité énergétique volumique de l'ordre de 0,1 à 0,2 Wh/l et un faible temps de décharge de l'ordre de quelques fractions de millisecondes [13].

Ils sont très souvent utilisés pour le démarrage de moteurs électriques ainsi que lorsqu'il y a un important besoin en énergie électrique sur un intervalle de temps assez court.

b. Supercondensateur

Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium, de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse (Figure 3).

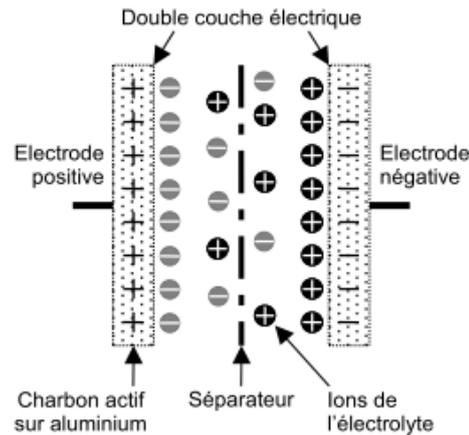


Figure 3. Structure d'un supercondensateur [14].

- Principe : le fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Ainsi, dans le supercondensateur, l'énergie est stockée sous forme électrostatique.
- Propriétés et applications : les supercondensateurs ont une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, un rendement de l'ordre de 95%, une autodécharge de l'ordre de 5% par jour et une capacité pouvant atteindre 5000 F [13, 22].

Ils sont très souvent utilisés dans le domaine du transport où sa technologie satisfait généralement aux fonctions de démarrage. Aussi, ils sont utilisés comme alimentation de secours de mémoires en informatique et de récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros...).

c. Inductances supraconductrices

Une station de stockage électromagnétique se compose principalement d'enroulements supraconducteurs appelés bobines supraconductrices connectées à un générateur par des transformateurs et des convertisseurs alternatif-continu à thyristors (Figure 4).

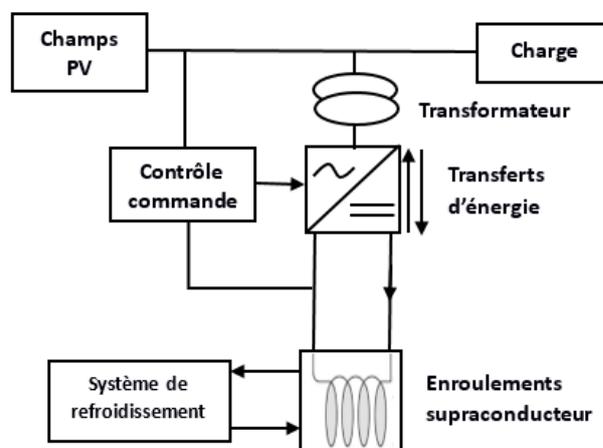


Figure 4. Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice [15,16].

- Principe : le stockage d'énergie dans une inductance supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, lorsqu'on fait passer un courant électrique continu dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte par effet Joule dans la bobine supraconductrice et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. La bobine est réalisée en matériau supraconducteur (matériau à très basses températures proches du zéro absolu 4,2 K) dans le but que l'énergie stockée ne soit pas dissipée par effet joule. La résistance ohmique du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide (environ -269,5 °C). Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur un récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée en un temps très court (50% en moins d'une seconde) [14,15,16].
- Propriétés et applications : avec une très grande puissance, les inductances supraconductrices ont la possibilité de décharge 50% de leur capacité en moins d'une seconde [17].

Ces technologies de stockages sont généralement connectées au réseau pour le stabiliser dynamiquement et transitoirement. D'autres sont utilisées pour le lissage des creux de tension pour les alimentations non interruptibles. Elles trouvent également des applications dans le domaine militaire comme une source impulsionnelle pour des lanceurs électromagnétiques par exemple.

1.2. Stockage indirect

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique).

a. Accumulateurs électrochimiques

Une batterie est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'accumulateurs électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte (Figure 5). L'accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile [14].

- Principe : aux interfaces électrodes-électrolyte de l'accumulateur interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes :

- au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue une réaction d'oxydation suivant la relation $M_1 \rightarrow M_1^{n+} + ne^-$ de potentiel redox E_1 ;

- à la cathode (électrode positive en décharge), les électrons libérés à l'anode transitent par le circuit extérieur pour atteindre la cathode où s'opère une réaction de réduction suivant l'équation $M_2^{n+} + ne^- \rightarrow M_2$ de potentiel redox E_2 .

M_1 et M_2 représentent respectivement les espèces actives à l'anode et à la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit $M_1 + M_2^{n+} \rightarrow M_1^{n+} + M_2$. Le transport engendre une force

électromotrice $E = E_2 - E_1$. Durant la charge, le phénomène s'inverse. La Figure 5 montre le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique.

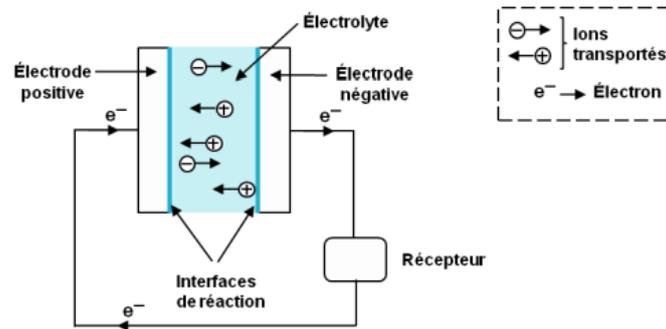


Figure 5. Principe d'un accumulateur électrochimique [12]

- Propriétés et applications : les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique pouvant atteindre 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre de 200 à 10000 cycles [13, 17].

Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale tel que les satellites Galiléo [18]. Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : lithium-ion, plomb-acide et nickel-cadmium [13].

- Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion)

Durant la charge, les ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se placer dans la structure de la cathode. L'équation électrochimique globale est la suivante : $Li + MI \rightarrow LiMI$ MI le matériau d'insertion (graphite, coke ...) placé à l'électrode positive. Par rapport aux batteries au plomb, les batteries au lithium-ion n'ont pas besoin de maintenance. Elles ont une durée de vie assez importante et présentent une plus grande résistance aux conditions extérieures [18]. La tension d'un accumulateur lithium-ion varie de 2,5V (état de charge minimum) à 3,7V (état de charge maximum) [19, 20].

- Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac)

La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde [11]. Son électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO_2 et l'électrode négative de plomb Pb. La réaction mise en jeu est la suivante : $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$.

La tension aux bornes d'un accumulateur varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum) [19, 20].

- Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd)

Les accumulateurs au nickel-cadmium offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et de durée de vie (Tableau 1). Cependant leur prix est nettement plus élevé et leur tension plus faible (1,15V à 1,45V) que ceux des batteries au plomb [19, 20].

L'électrolyte est à base de potasse, l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative de cadmium. Ces éléments réagissent de la manière suivante : $2Ni(OH) + Cd + 2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$. Le Tableau 1 donne une comparaison des caractéristiques de quelques accumulateurs électrochimiques [17-20].

Technologies	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Temps de décharge	Durée de stockage	Autodécharge (%/mois)	Rendement (%)	Durée de vie (nombre de cycles)	Coût (FCFA/kWh)
Plomb-acide (Pb-ac)	25 - 45	80 - 150	15mn -100h	>1 mois	40	60-98	300-1500	32750-131000
Lithium-ion (Li-ion)	80-150	500-2000	45mn-100h	Plusieurs mois	20	90-100	>1500	458500-655000
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	20-60	100-800	15mn-100h	<1mois	25	60-80	300-1500	131000-393000

Tableau 1. Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques.

b. Stockage sous forme d'hydrogène

Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène (H₂) puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité.

- Principe : l'excès de l'énergie produit par le système PV est utilisé par un électrolyseur (passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide) pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène suivant l'équation : $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$.

L'hydrogène ainsi produit est stocké sous forme gazeuse, liquide ou solide. Durant les périodes de fortes consommations, il existe différents moyens pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise l'hydrogène et l'oxygène comme couple électrochimique ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon un procédé de la méthanation qui consiste à utiliser l'hydrogène produit par l'électrolyseur pour produire du méthane. Le méthane ainsi obtenu peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de produire de l'électricité. Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la Figure 6.

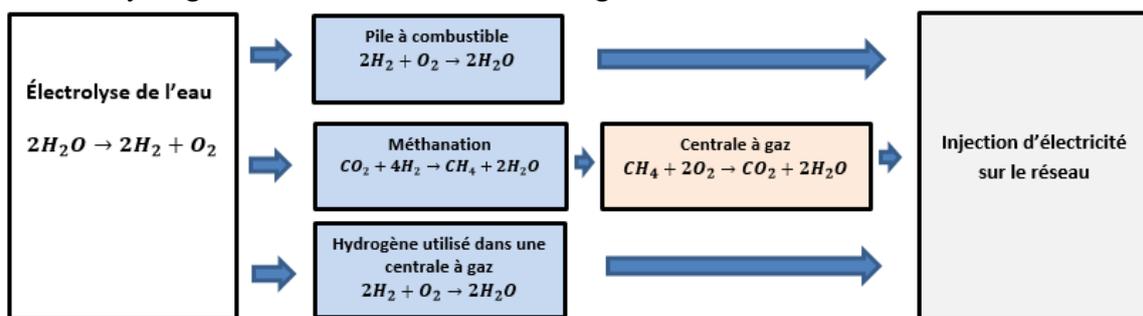


Figure.6 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

- Propriétés et applications : l'hydrogène obtenu peut être stocké sur de longues périodes. Toutefois, son efficacité énergétique est faible [11].

Au-delà de ses applications comme carburant, l'hydrogène, vecteur énergétique, pourrait constituer une source d'électricité pour les milieux isolés où il est difficile voire coûteux, d'installer des lignes électriques. Il existe peu d'installations de stockage d'énergie sous forme hydrogène. Actuellement, la plus grande installation est celle d'Utsira en Norvège.

c. Stockage hydraulique

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) sont composées de deux retenues d'eau situées à des hauteurs différentes et reliées par un système de canalisation. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. La Figure 7 montre le principe de fonctionnement d'une STEP.

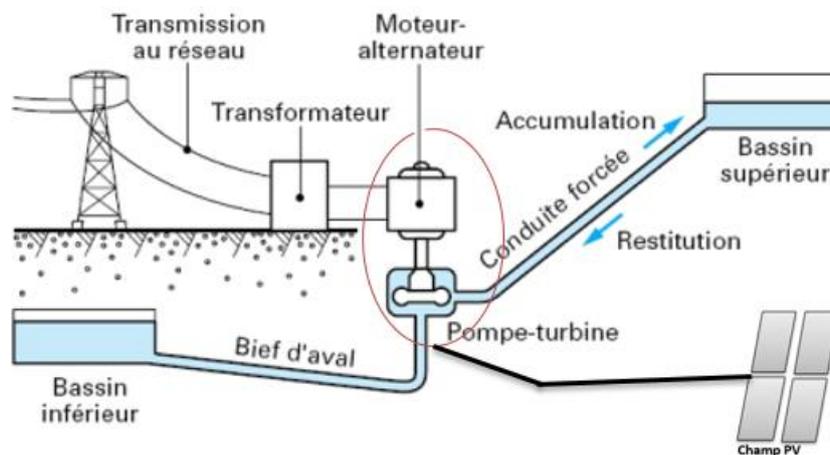


Figure 7. Schéma de principe de fonctionnement au cas où il est associé aux PV [21].

- Principe : durant les périodes de forts ensoleillements, lorsque le champ photovoltaïque fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée et conduite vers le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lorsque le réseau connaît un déficit de production électrique, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau fait tourner une turbine hydraulique qui alimente un alternateur et produit de l'électricité comme indiqué sur la figure 7. Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué indéfiniment.
- Propriétés et applications : la taille importante des installations permet de stocker de grandes quantités d'énergie (1-10GWh). Également, en fonction de la hauteur d'eau, les installations peuvent délivrer de grandes puissances : de quelques dizaines de MW à plusieurs GW [21]. Toutefois, l'installation d'une STEP nécessite une géographie adaptée.

Le stockage hydraulique représente la technologie de stockage à grande échelle la plus utilisée dans le monde. Jusqu'en 2015, la capacité totale installée à travers le monde était près de 1210089 GWh délivrant une puissance d'environ 3995935 MW [22].

d. Stockage à air comprimé (CAES)

Dans cette technologie de stockage, l'air est comprimé et stocké dans des réservoirs ou dans des cavités souterraines.

- Principe : l'énergie produite par une centrale photovoltaïque peut d'une part être injectée dans le réseau et d'autre part être utilisée pour comprimer (grâce à un turbocompresseur) l'air ambiant à haute pression (100 à 300 bars) pendant les périodes de faibles consommations. L'air est ensuite stocké à une pression moyenne de 40 à 70 bars et à une température proche de l'ambiante. Pour récupérer l'énergie stockée, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Dans laquelle, il est chauffé grâce à un apport d'énergie venant de l'extérieur ; ce qui augmente sa pression. Puis, il est détendu dans une turbine. La turbine a pour rôle de convertir l'énergie cinétique issue de la combustion de l'air en travail mécanique. L'énergie mécanique obtenue est ensuite convertie en énergie électrique grâce à un alternateur. Le principe de fonctionnement est résumé dans la Figure 8 [23, 24]. La chaleur résiduelle de la compression peut être récupérée et utilisée pour chauffer l'air (stockage adiabatique).

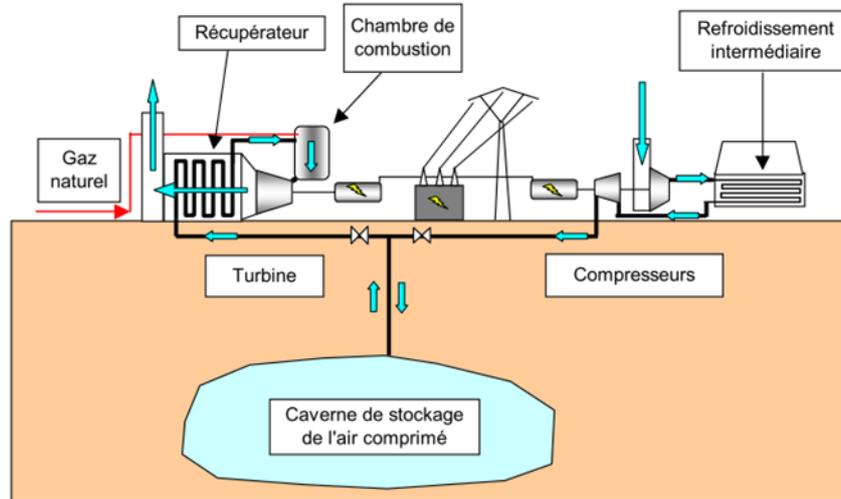


Figure 8. Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé [23, 24].

- Propriétés et applications : le stockage à air comprimé permet de stocker de grandes quantités d'énergie de l'ordre de 10 MWh à 10 GWh. Il a une autonomie pouvant atteindre plusieurs jours et un rendement d'environ 50% [23].

Sa technologie est relativement mature avec plusieurs réalisations de grandes puissances à travers le monde : en Allemagne (Huntorf 290 MW), aux États unis (Norton 2700 MW).

Toutefois, la construction d'un système CAES nécessite de disposer d'une géologie favorable permettant de disposer de grandes cavités souterraines [25].

e. Volant d'inertie

Un volant d'inertie stocke l'énergie fournie par un générateur photovoltaïque sous forme d'énergie cinétique de rotation. Il est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique comme illustré sur la Figure 9.

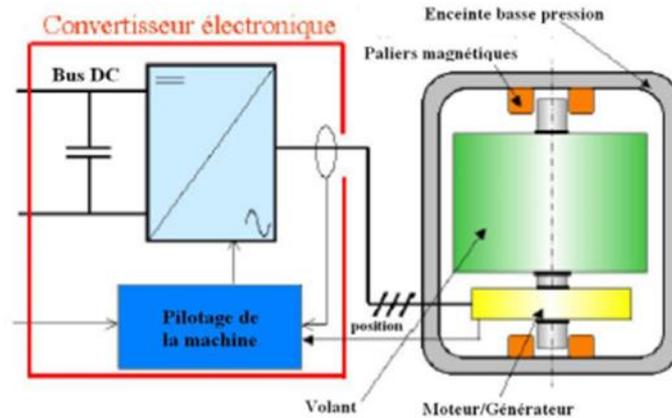


Figure 9. Principaux composants d'un système de stockage électromécanique inertiel [26]

- Principe : l'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue de tourner, même si aucun courant ne l'alimente. L'énergie stockée dans le volant d'inertie est donc sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie [27].
- Propriétés et applications : les systèmes de stockage par volant d'inertie ont en général un rendement de charge-décharge de l'ordre 85% et d'une grande longévité. Ils ont un rendement global d'environ 78% au bout de 5 heures de fonctionnement et de 45% au bout d'une journée de fonctionnement [28]. Les stockages de longues durées, avec un tel dispositif, ne sont donc pratiquement pas envisageables. Ces systèmes sont adaptés pour des applications de régulation, d'optimisation énergétique et d'amélioration de qualité (microcoupures, coupures brèves, etc.). Par exemple, les volants d'inertie sont utilisés dans l'industrie comme réserve énergétique en cas de défaillance des générateurs et pour stabiliser les fluctuations des sources énergétiques.

f. Stockage sous forme thermique

Une grande partie de la conversion ou du transport énergétique se fait sous forme de chaleur, il est alors important d'examiner le potentiel du stockage thermique.

- Principe : le stockage de chaleur peut se faire de deux manières différentes :
 - le stockage thermique par chaleur sensible consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation de la chaleur. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de la température et à la quantité de matière concentrée ;
 - le stockage thermique par chaleur latente de fusion consiste à stocker de l'énergie thermique dans un matériau qui subit un changement d'état à une température donnée. En effet, l'excès de l'énergie fournit par un générateur photovoltaïque peut être utilisé pour élever la température d'un matériau. Le matériau tel que : Al, Mg, Si ou Zn possède des propriétés appropriées à cet effet [29]. Lorsque la température du matériau atteint la température de changement d'état, le matériau initialement solide passe à l'état liquide

grâce à la chaleur absorbée. L'énergie thermique accumulée par le matériau est restituée avec une baisse progressive de la température lorsque le générateur photovoltaïque connaît un déficit. Le matériau passe alors de l'état liquide à l'état solide en restituant la chaleur absorbée [11]. Au-delà, du changement d'état solide-liquide, il peut y avoir d'autres changements d'états de la matière : gaz-solide, gaz-liquide....

- Propriétés et applications : les systèmes de stockage d'énergie sous forme thermique ont un rendement pouvant atteindre 90% et une autonomie assez élevée (plusieurs semaines).

Par rapport à la technologie de stockage d'énergie par chaleur latente, la technologie de stockage par chaleur sensible est plus mature. Elle est utilisée industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques. Cependant, la technologie de stockage par chaleur latente n'est pas encore développée industriellement. La majorité des études menées sur ce type de technologie a été faite à l'échelle de laboratoire.

2. Méthodologie de comparaison

L'intégration des différentes technologies de stockage dans les systèmes PV soulève des interrogations quant au choix de la technologie la plus adaptée aux besoins.

Le Tableau 2 présente quelques données technico-économiques chiffrées pour les principales technologies de stockage d'énergie [23, 30, 31, 32].

Technologies	Densité d'énergie (Wh/kg)	Puissance	Capacité	Autonomie	Rendement (%)	Durée de vie	Coût (FCFA/kWh)	Maturité
STEP	1kWh/m ³ pour une chute de 360 m	0,1-1GW	1-100GWh	Qlq jours	65-80	> 40 ans	47500-97500	Très bonne
CAES	12kWh/m ³ pour une caverne de 100 bars	100-1000MW	10MWh-10GWh	1h-qlq jours	50	> 30 ans	32500-52000	Moyenne
Volant d'inertie	1-5 kWh/kg	2-40MW	0.5-10MWh	Qlq mn-1h	80-90	10000-100000 cycles	98250-1310000	Moyenne
Inductances supraconductrices	1-5 Wh/kg	10kW- 5MW	1-10 kWh	Qlq s- 1mn	> 90	20-30 ans	> 6550000	Moyenne
Supercondensateur	5-10 kWh/kg	10kW- 5MW	1-5 kWh	Qlq mn	90- 95	10000-500000 cycles	10480000	Moyenne
Accumulateurs électrochimiques	20- 120 kWh/kg	10kW- 1000MW	10kWh- 1000MWh	10mn- 10h	70- 80	500- 4000 cycles	32750- 655000	Très bonne
Batterie à circulation	à 33 kWh/m ³	1- 10MW	10- 100MWh	> 1 mois	70	2000- 12000 cycles	65500- 196500	Prototype
Hydrogène et pile à combustible	300- 600Wh/kg	1kW- 10MW	10kWh- 10GWh	1h-qlqs jours	30- 50	5-10ans	325000- 975000	Moyenne

Tableau 2. Données technico-économiques pour les principales technologies de stockage.

2.1. Comparaison selon l'autonomie, la puissance et la capacité

L'autonomie, la puissance et la capacité représentent des paramètres importants dans un système de stockage. En effet, chaque technologie de stockage doit avoir :

- une autonomie assez élevée pour pallier entièrement au déficit énergétique en cas de non production du générateur PV ;
- une forte puissance adaptée à la demande ;
- une capacité suffisante.

La Figure 10 montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des longues périodes concernent principalement les STEP, les CAES et le stockage sous forme thermique. Toutefois, la batterie à circulation (redox-flow) possède une capacité assez élevée lui permettant de stocker d'importantes quantités d'énergie de l'ordre de deux (2) MWh.

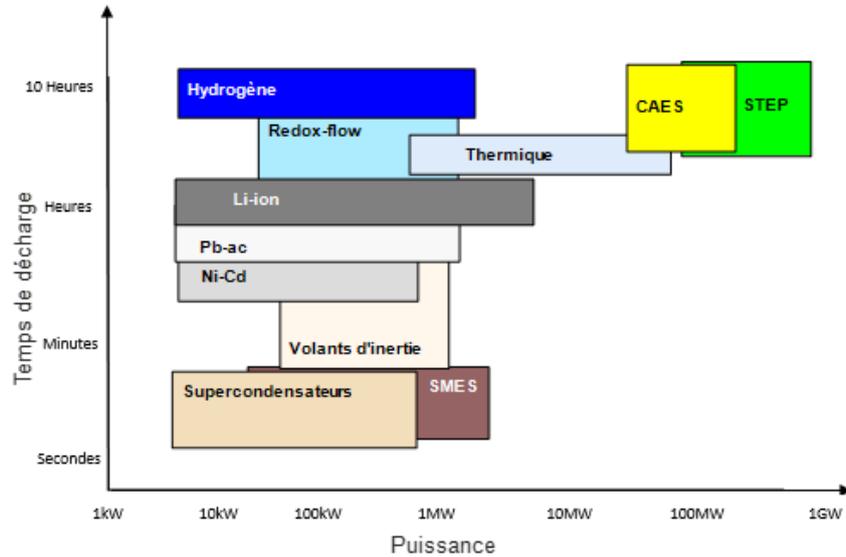


Figure 10. Autonomie des technologies de stockage en fonction de leur puissance [33].

La Figure 11 compare les différentes technologies de stockage d'énergie en termes de puissance, de capacité et de temps de décharge [21]. Pour les applications à grande échelle, les STEP et les CAES sont les procédés les mieux adaptés car, ils ont une puissance, une capacité et un temps de décharge très élevés.

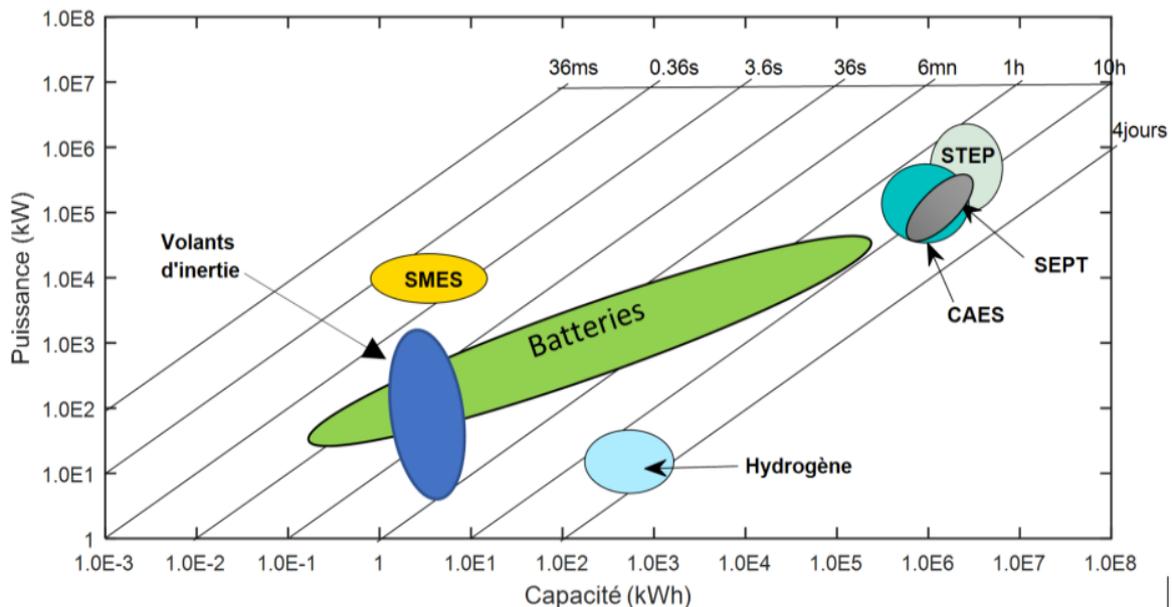


Figure 11. Comparaison en termes de puissance et de capacité en fonction du temps de décharge.

2.2. Comparaison selon l'efficacité énergétique et la durée de vie

Le moyen de stockage idéal disposerait à la fois d'une efficacité énergétique et d'une durée de vie élevées. Sur la Figure 12 seuls le supercondensateur et le volant d'inertie présentent ces deux propriétés. Quant à la batterie au Li-ion, il a une efficacité énergétique élevée mais avec une durée de vie relativement faible.

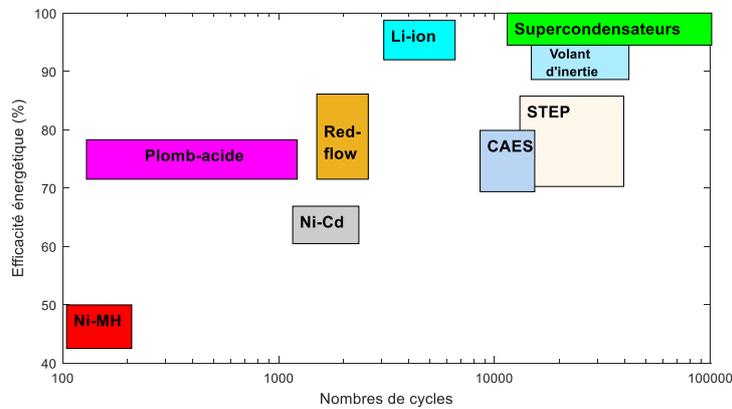


Figure 12. Comparaison entre l'efficacité énergétique et la durée de vie [8].

2.3. Comparaison selon les coûts

Les coûts d'investissements représentent un paramètre économique très important car ils conditionnent le coût global de la production énergétique. La Figure 13 nous montre que le CAES, la STEP et les accumulateurs au plomb ont un coût d'investissement par unité de puissance et d'énergie faible. Cependant, ceux des accumulateurs au nickel-cadmium, au lithium-ion et redox-flow sont élevés. L'intégration de ces derniers comme technologie de stockage va augmenter le coût global du système photovoltaïque.

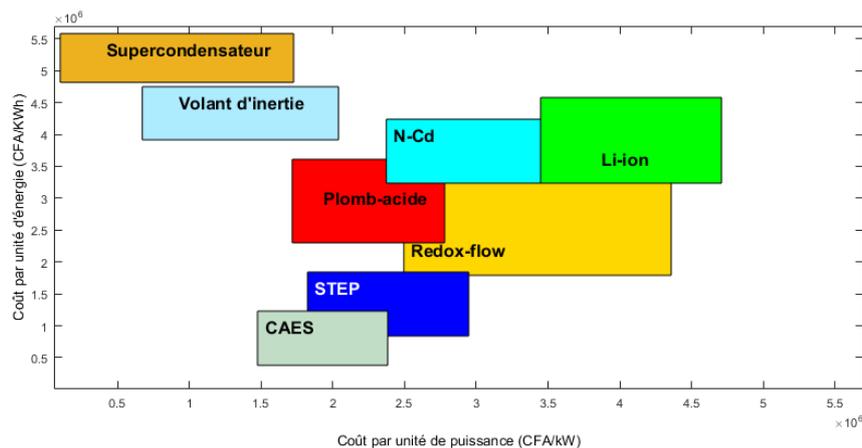


Figure 13. Comparaison entre les coûts d'investissements par unité de puissance et par unité d'énergie [33,34].

Lorsque l'application à une fréquence de charge/décharge élevée, le coût par cycle peut être la meilleure façon d'évaluer le coût du dispositif de stockage. La Figure 14 donne une comparaison des coûts d'investissement des dispositifs de stockage calculés par cycle. On remarque que la STEP et le CAES ont un coût d'investissement par cycle parmi les plus bas.

Par contre, les accumulateurs possèdent les coûts d'investissement par cycle les plus élevés causés par leur dégradation rapide en cyclage. Par conséquent, il faut à chaque fois remplacer les batteries. Cela augmente leurs coûts d'investissements par cycle.

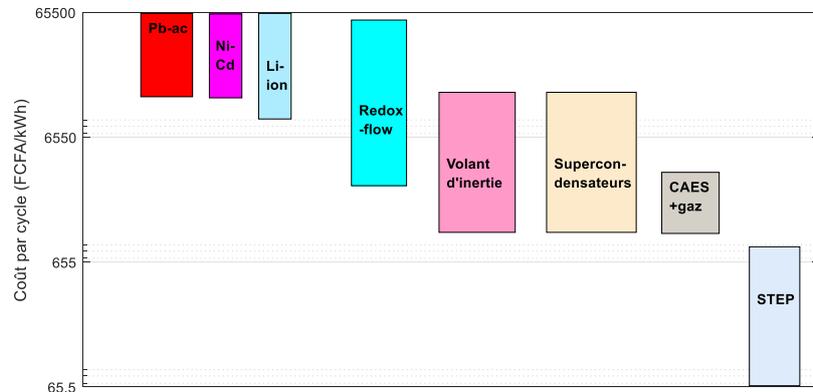


Figure 14. Comparaison selon les coûts d'investissements calculés par cycle [6].

2.4. Comparaison selon le niveau de maturité technologique

Malgré sa grande capacité énergétique, le stockage d'énergie sous forme thermique est toujours au stade de recherche. Par contre, les STEP, les CAES, les inductances supraconductrices et les accumulateurs électrochimiques tels que : le plomb-acide, le lithium-ion, le nickel-cadmium ont une maturité technologique très avancée (Figure 15).

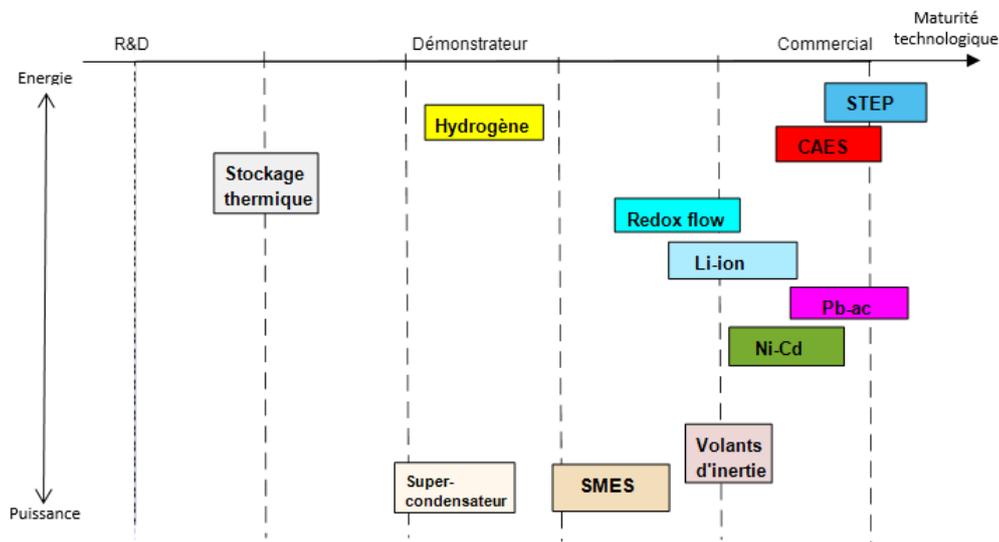


Figure 15. Niveau de maturité technologique des différentes technologies de stockage d'énergie [13].

3. Critères de choix des technologies de stockage pour les applications photovoltaïques autonomes

Pour faire le choix des technologies de stockage appropriées, nous avons considéré un certain nombre de caractéristiques propres aux systèmes PV que sont :

- une autonomie assez élevée : la moyenne d'insolation dans la sous-région est d'environ 8,3 heures par jour [2]. Durant les périodes non ensoleillées, c'est l'énergie apportée par le dispositif de stockage qui doit assurer la fourniture de la charge ;
- une capacité énergétique et une puissance disponible assez élevées : il faut au moins une capacité énergétique de 400 kWh et une puissance d'une centaine de kW ;
- un rendement et une durée de vie élevés : ce sont des paramètres importants à considérer car ils influencent le coût global de la production d'énergie. En effet, un faible rendement du système de stockage augmente le coût d'utilisation car seulement une petite partie de l'énergie stockée est utilisée. Également, une faible espérance de vie fait augmenter le coût global en raison de la fréquence de remplacement des équipements ;
- des coûts d'investissement et de fonctionnement des dispositifs de stockage faibles : leur accessibilité à toutes les couches de la population en dépend ;
- une température de fonctionnement élevée : le dispositif doit être capable de fonctionner normalement dans un climat sahélien (climat chaud et sec) ;
- une technologie mature : elle doit être largement diffusée et ne doit pas représenter un danger pour la santé humaine et environnementale.

4. Choix des dispositifs de stockage

A l'issue des différentes comparaisons entre les techniques de stockage (Figures 10 à 15) et en tenant compte des caractéristiques propres aux systèmes PV, il ressort que les technologies de stockage tels que :

- les condensateurs, les supercondensateurs, les inductances supraconductrices et le volant d'inertie ont une autonomie et une capacité faibles. Ils ne sont donc pas adaptés pour un stockage d'énergie d'origine photovoltaïque. Toutefois, ils peuvent être associés à d'autres dispositifs de stockage dans un système PV lorsqu'il y a des appels de puissance élevés de la charge ;
- la toxicité due au cadmium représente un danger pour l'environnement et le coût encore élevé de ces accumulateurs au nickel, freinent leur utilisation dans les systèmes PV ;
- le stockage sous forme thermique a une autonomie et une puissance élevées avec un faible coût. Malheureusement, cette technologie est toujours au stade de recherche ;
- les STEP, les CAES, les accumulateurs électrochimiques (plomb-acide et lithium-ion), les batteries redox et le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène possèdent des caractéristiques assez remarquables (capacités énergétique et puissance élevées, une bonne autonomie, etc.). Ils peuvent donc être utilisés comme technologies de stockage dans les systèmes photovoltaïques.

La représentation du diagramme de Ragone est une technique très fréquemment utilisée pour comparer directement les performances des dispositifs de stockage (Figure 10 à 15) [6, 31]. Il s'agit d'un moyen de comparaison adapté pour les applications mobiles dans lesquelles la masse est un critère très important. Cependant dans le cas d'une application PV, la capacité, l'autonomie, la durée de vie et le coût total représentent des critères encore plus importants. Ainsi, les comparaisons effectuées dans les paragraphes précédents sont excessivement simplistes. Ils ne permettent donc pas de dégager une conclusion définitive à propos du choix de la technologie de stockage la plus appropriée pour chaque type d'application. Pour une

comparaison plus efficace, nous allons utiliser une méthode de comparaison basée sur la détermination de l'indice de performance.

5. Comparaison selon l'indice de performance

Les dispositifs de stockage sont généralement spécifiques pour des applications données. Afin de comparer les performances des différentes solutions de stockage et déterminer la technologie la plus efficace pour les systèmes PV en fonction de la nature d'application, nous avons développé une approche qui s'inspire de celle de Ibrahim et al [5,7] et utilisée dans le cas d'un générateur éolien. Elle se base sur l'indice de performance qui permet de comparer les performances des dispositifs de stockage en utilisant des critères basés sur leurs caractéristiques et associés à des coefficients de pondération. Dans la suite du travail, selon les caractéristiques, nous considérons les critères associés au coût le plus faible, l'autonomie la plus élevée, l'autodécharge la plus faible, la cyclabilité la plus élevée, l'adaptabilité la plus élevée, l'efficacité la plus élevée, la capacité la plus élevée, la maturité la plus élevée, l'aspect écologique la plus élevée, la sécurité la plus grande et le temps de réponse le plus faible.

Pour une comparaison plus fine par rapport à ce qui est généralement fait [4-8, 18], nous regroupons d'abord les techniques de stockage en deux catégories d'applications autonomes suivant la valeur de la puissance fournie. Ensuite nous définissons les coefficients de pondération pour chaque catégorie et calculons l'indice de performance. Sa détermination se fait à l'aide d'une matrice de décision qui permet de pondérer l'importance, par des coefficients variant de 5 à 10%, de chaque caractéristique du système de stockage en fonction des exigences spécifiques de l'application considérée.

♦ Catégorie 1 : applications autonomes à petite échelle

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est inférieure à 100 kWc. La mise en œuvre de la matrice de décision prend en considération l'interaction entre les critères de choix cités dans le paragraphe 3, les données de références du système de stockage ainsi que les caractéristiques d'une application PV autonome et surtout le principal objectif dans cette catégorie : une technologie de stockage pouvant satisfaire aux besoins d'une charge de puissance 100 W à 100 kW. Ainsi, plus d'importance a été accordée au coût, à l'autonomie, à l'autodécharge, à la cyclabilité et à l'adaptabilité au système PV. Un coefficient de pondération de 10% a été attribué pour chacun de ces critères. Par ailleurs, l'efficacité, la capacité de stockage, la diminution des GES et la maturité étant considérés comme des critères moins importants ont chacun été pondéré par un coefficient de 7,5%. Enfin, l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité ont chacun été pondérés par un coefficient de 5% car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie (Figure 16).

La matrice globale de décision est construite à l'aide de plusieurs matrices élémentaires de décision. En effet, pour chaque critère (coût, cyclabilité, maturité...), on construit une matrice élémentaire de décision dans laquelle, le système peut prendre, la valeur :

- 1 ou 0 lorsque l'un des dispositifs de stockage est respectivement plus ou moins performant que les autres ;
- 0,5 lorsque les dispositifs de stockage sont en égalité de performances [7] ;
- la case reste vide quand la comparaison est faite entre la même technologie.

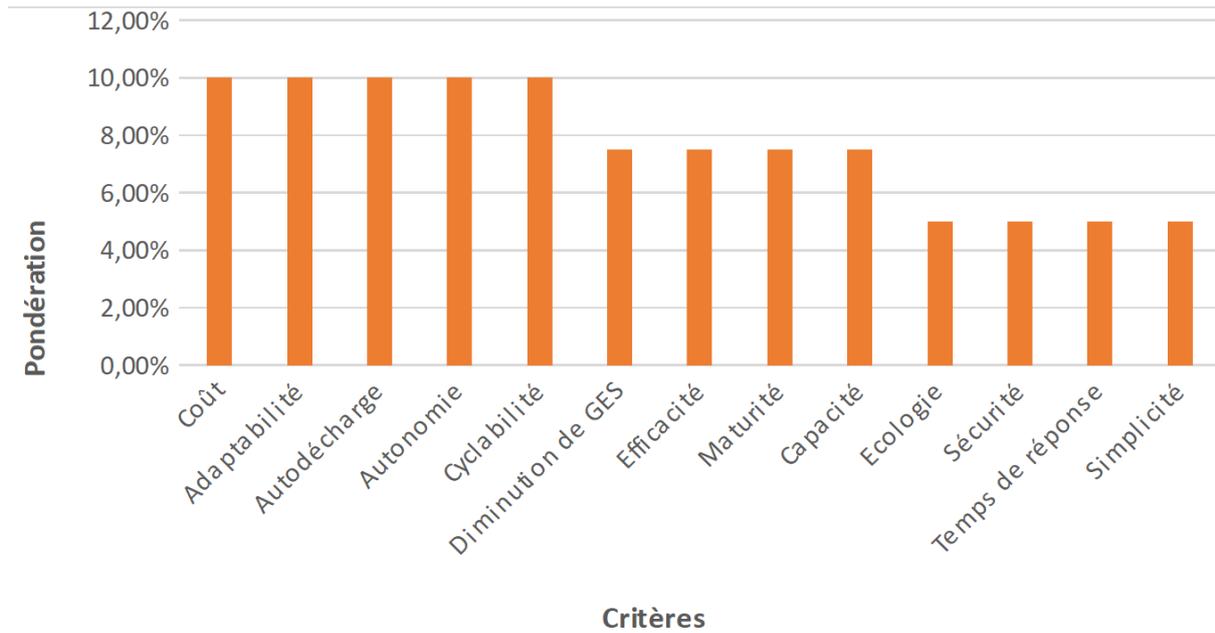


Figure. 16 Répartition des différents critères.

Ainsi, nous avons obtenu 13 matrices de décision élémentaires correspondant aux 13 critères repartis sur la Figure 16. Les Tableaux 3 et 4 donnent des exemples de matrices élémentaires de décision pour une application autonome à petite échelle.

Coût	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion	Total
STEP		0,5	0	0	0	0	0,5
CAES	0,5		0	0	0	0	0,5
Hydrogène	1	1		0	0	0	2
Redox	1	1	1		0	0	3
Pb-ac	1	1	1	1		0,5	4,5
Li-ion	1	1	1	1	0,5		4,5

Tableau 3. Matrice élémentaire de décision pour le critère de coût.

La matrice globale de décision (Tableau 5) est construite à l'aide des coefficients de préférence globale qui ont été attribués pour chaque technologie de stockage et à partir des 13 matrices élémentaires de décision. En effet, la multiplication des totaux obtenus dans les matrices de décision élémentaire de chaque technologie par son coefficient de pondération et la sommation des résultats obtenus permet de classer les différents dispositifs de stockage par ordre de performance.

Cyclabilité	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion	Total
STEP		0,5	1	1	1	1	4,5
CAES	0,5		1	1	1	1	4,5
Hydrogène	0	0		0,5	1	1	2,5
Redox	0	0	0,5		1	0,5	2
Pb-ac	0	0	0	0		0	0
Li-ion	0	0	0	0,5	1		1,5

Tableau 4. Matrice de décision élémentaire pour le critère de cyclabilité.

	Pondération	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion
Adaptabilité aux PV	0,1	0,05	0,05	0,25	0,25	0,45	0,45
Coût	0,1	0,05	0,05	0,2	0,3	0,45	0,45
Autonomie	0,1	0,3	0,3	0,25	0,25	0,15	0,25
Autodécharge	0,1	0,4	0,4	0,4	0,15	0,05	0,15
Cyclabilité	0,1	0,45	0,45	0,25	0,2	0	0,15
Efficacité	0,075	0,1875	0	0,075	0,1875	0,3375	0,3375
Capacité	0,075	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875
Diminution des GES	0,075	0,3	0,3	0,3	0,075	0,075	0,075
Maturité	0,075	0,225	0,0375	0,15	0,1125	0,375	0,3
Sécurité	0,05	0,175	0,175	0	0,175	0,05	0,175
Aspect écologique	0,05	0,2	0,2	0,2	0,075	0,05	0,05
Temps de réponse	0,05	0	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2
Simplicité	0,05	0,05	0,05	0,075	0,15	0,225	0,225
Total	1	2,575	2,25	2,4375	2,3125	2,6	3
Rang		3	6	4	5	2	1

Tableau 5. Matrice globale de décision (petite échelle).

Cette matrice globale de décision montre que les accumulateurs au lithium-ion se placent au premier rang, suivi des accumulateurs au plomb-acide en termes de performances.

♦ **Catégorie 2 : applications autonomes à moyenne échelle**

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est supérieure ou égale à 100 kWc. Dans cette catégorie, l'élaboration de la matrice de décision s'effectue pratiquement de la même manière que dans la première catégorie. La seule différence est liée à l'objectif

principal ; il s'agit dans cette partie d'avoir un système de stockage dont la puissance peut satisfaire aux besoins d'une charge de plus de 100 kW. Ainsi, les critères basés sur : la capacité, l'efficacité, le coût, la cyclabilité et l'adaptabilité au système PV ont été retenus comme étant les plus importants. Chaque critère a donc été pondéré par un coefficient de 10%. L'autonomie, l'autodécharge, la maturité et la diminution des GES étant considérés comme des critères moins importants que les premiers. Un coefficient de 7,5% leur a été attribué. Quant à l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité, une pondération de 5% a été attribuée à chacun des critères associés car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie. La Figure 17 montre la répartition des différents critères.

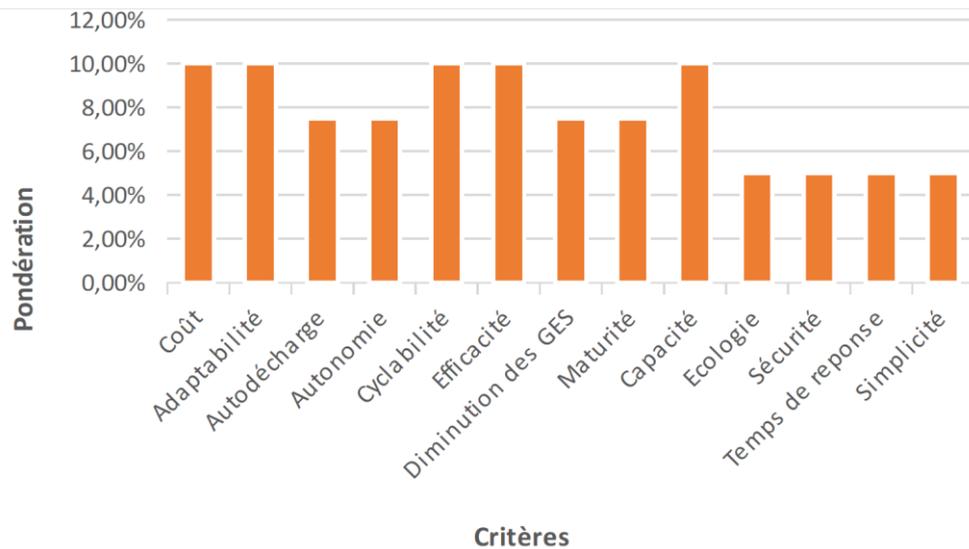


Figure 17. Répartition des différents critères pour une application autonome à grande échelle.

Le Tableau 6 illustre la matrice de décision globale pour le cas d'une application à moyenne échelle. Cette matrice est obtenue en suivant le même procédé que celle obtenue dans le cas d'une application à petite échelle.

Le Tableau 6 montre en termes de performance, que pour une application à moyenne échelle, les STEP viennent en première position et les CEAS en seconde position.

A partir des deux matrices de décision globales (Tableaux 5 et 6), pour les deux types d'applications, nous avons déterminé l'indice de performance (Figure 18).

Dans la catégorie 1, les accumulateurs au lithium-ion et plomb-acide affichent de meilleures performances par rapport aux autres techniques de stockages. Les supercondensateurs, les inductances supraconductrices et les volants d'inertie ayant une dynamique plus rapide peuvent aussi être associés à ces accumulateurs (lithium-ion ou plomb-acide) pour réguler l'énergie lors des appels de puissances élevées. Cela permettra d'éviter le surdimensionnement des batteries et d'augmenter leurs performances.

Pour les applications à grandes échelles (catégorie 2), ce sont : la STEP et le CAES qui sont les plus appropriés. Toutefois, ces technologies de stockages nécessitent des sites adaptés. Les anciens sites miniers sous-terrain peuvent être utilisés pour stocker l'air comprimé. Pour les STEP, Les barrages hydroélectriques existants peuvent être transformés en STEP.

	Pondération	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion
Adaptabilité aux PV	0,1	0,15	0,15	0,15	0,25	0,45	0,45
Coût	0,1	0,4	0,5	0,05	0,25	0,25	0,05
Autonomie	0,075	0,3	0,3	0,3	0,075	0	0,15
Autodécharge	0,075	0,375	0,225	0,225	0,225	0	0,075
Cyclabilité	0,1	0,4	0,4	0,4	0,15	0	0,15
Efficacité	0,1	0,25	0	0,1	0,25	0,4	0,5
Capacité	0,1	0,45	0,45	0,25	0,25	0,05	0,05
Diminution des GES	0,075	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875
Maturité	0,075	0,2625	0,075	0,1125	0,075	0,3375	0,1875
Sécurité	0,05	0,175	0,175	0	0,175	0,05	0,175
Aspect écologique	0,05	0,2	0,2	0,2	0,075	0,05	0,05
Temps de réponse	0,05	0	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2
Simplicité	0,05	0,125	0,125	0,025	0,025	0,225	0,225
Total	1	3,275	2,8375	2,1	2,1875	2,2	2,45
Rang		1	2	6	5	4	3

Tableau 6. Matrice globale de décision (moyenne échelle).

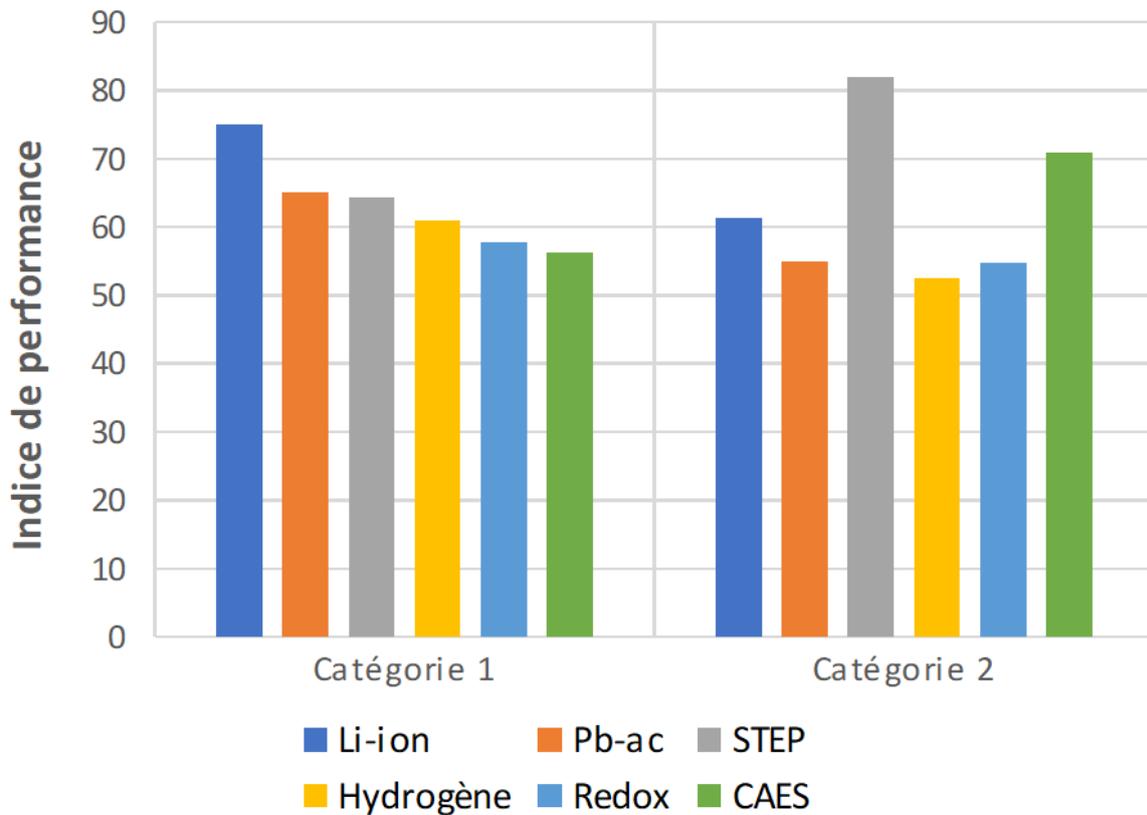


Figure 18. Indices de performances des technologies de stockage applicables aux systèmes PV suivant deux catégories d'applications.

Conclusion

L'étude comparative des différents dispositifs de stockage effectué dans ce travail a permis de dégager les technologies de stockage qui peuvent être utilisées dans les systèmes PV. Grâce au regroupement des techniques de stockage en deux catégories d'applications et à l'utilisation de la méthode de comparaison basée sur de l'indice de performance, nous avons déterminé pour chaque catégorie, les techniques de stockage les plus adaptées.

Ainsi, pour les applications à petite échelle (inférieure à 100 kWc), la batterie au lithium-ion est la meilleure option comparée aux autres technologies en matière de performances. Malgré ses performances, les accumulateurs au lithium-ion sont moins répandus que ceux au plomb-acide à cause de leur coût plus élevé. Généralement, les systèmes PV autonomes utilisés en zones sahéliennes sont à petite échelle. Pour des applications à moyenne échelle (supérieure à 100 kWc), la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est souhaitable. Plusieurs grandes réalisations de STEP existent déjà à travers le monde. A titre d'exemple, nous avons les centrales de : Bath County 3003 MW (Etats-Unis), Huizhou 2448 MW (Chine), Grand'maison 1800 MW (France)... Les résultats obtenus confirment bien les résultats des études menées par [6, 31] pour des applications photovoltaïques.

Toutefois, ces résultats doivent être confirmés par une étude expérimentale notamment sur les accumulateurs au lithium-ion et plomb-acide pour les systèmes PV autonomes.

Références

- [1] D. Bonkougou (2016) « *Étude de l'impact de la variabilité de l'irradiation solaire et des paramètres météorologiques sur la production d'énergie d'une centrale solaire PV alimentant en réseau isolé un village du Burkina Faso* », Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou.
- [2] M. Waongo, Z. Koalaga, F. Zougmore (2012) « *A guideline for sizing Photovoltaic panels across different climatic zones in Burkina Faso* » IOP science, vol.29, doi:10.1088/1757-899X/29/1/012014.
- [3] E.W. Ramde (2013) « *Concentrating solar power in west africa : site selection and potential assessment* », Thèse de doctorat, 2ie.
- [4] G. Robin, M. Ruellan, B. Multon, H. B. Ahmed, P.Y. Glorennec (2012) « *Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable* », Hal-00676109.
- [5] H. Ibrahim, M. Dimitrova, Y. Dutil, D. Rousse, A. Ilinca, J. Perron (2012) « *Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method* », innostok, the 12th International Conference on Energy Storage.
- [6] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron (2008) « *Energy storage systems-Characteristics and comparisons* » ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.12, pp. 1221–1250. doi : 10.1016/j.rser.2007.01.023.
- [7] H. Ibrahim, M. Dimitrova, D. Rousse, A. Ilinca, J. Perron (2011) « *Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage* », CIFQ / ÉnergRenouv01.
- [8] J.I.S Martin, I. Zamora, J.J.S. Martin, V. Aperribay, P. Eguía (2011) « *Energy storage technologies for electric applications* » RE&PQJ, N°.1, Vol.9.

- [9] Y. Riffonneau (2009) « *Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau* », Thèse de doctorat, université Joseph Fourier.
- [10] M. Belhadj, T. Benouaz, M. Sellam, F. Hadjaj (2010) « *Modélisation d'un système de stockage chargé par un système PV* », Journal of Scientific Research, N° 0, vol. 2.
- [11] J. Gustavsson (2016) « *Energy storage technology comparison* » Bachelor of science thesis, KTH school of industrial engineering and management.
- [12] M. A. Camara (2011) « *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs* », Thèse de doctorat, Université Paris Est Créteil.
- [13] A. EDDAHECH (2013) « *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride* » thèse de doctorat, Université bordeaux1.
- [14] S. Pelissier (2012) « *Introduction au vieillissement des batteries Lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie* », hal-01228457, IFSTTAR.
- [15] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding (2009) « *Progress in electrical energy storage system: A critical review* », Progress in natural science, Vol. 19, pp. 291-312.
- [16] S. M. Ingale, A. P. Chaudhari, G. K. Mahajan (2013) « *A review on advance energy storage technology for microgrid and smartgrid* », International Journal of Science, Vol. 2.
- [17] N. Dellivers (2013) « *Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique* », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [18] I. Baboselac, Ž. Hederić, T. Benšić (2017) « *Matlab simulation model for dynamic mode of the lithium-ion batteries to power the ev* », Technical journal, Vol. 11, pp. 7-13, ID: TG-20170126230213.
- [19] C. Mondru, D.V. A. Kumar, R. Kiranmayi (2017) « *Batteries comparative analysis and their dynamic model for electric vehicular technology* », International journal of pure and applied mathematics, Vol. 114, N°. 12, pp. 453-467.
- [20] B. Plangklang, P. Pornharuthai (2013) « *Mathematical model and experiment of temperature effect on discharge of lead-acid battery for PV systems in tropical area* » Energy and power engineering, Vol. 5, pp 43-49.
- [21] T. Desrues (2011) « *Stockage massif d'électricité sous forme thermique* », Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- [22] The International Renewable Energy Agency (IRENA) (2017), Abu Dhabi, www.etsap.org - www.irena.org.
- [23] H. Ibrahim (2010) « *Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé* » Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.
- [24] B. C. Cheung, R. Cariveau, D. S-K. Ting (2014) « *Parameters affecting scalable underwater compressed air energy storage* » Applied Energy, Vol. 134, pp 239–247.
- [25] J.I. S. Martín, I. Zamora, J.J. S. Martín, V. Aperribay, P. Eguía (2011) « *Energy storage technologies for electric applications* » RE&PQJ, Vol.1, N°.9, pp. 593-598.

- [26] H. Hamouche (2010) « *Système inertiel de stockage d'énergie à palier supraconducteur* », Revue des énergies renouvelables, Vol. 10, pp. 189-193.
- [27] K. Aydin, M. T. Aydemir (2016) « *Sizing design and implementation of a flywheel energy storage system for space applications* », Turkish journal of electrical engineering & computer sciences, Vol. 24, pp. 793-806, doi:10.3906/elk-1306-206.
- [28] M. E. Amiryar, K. R. Pullen (2017) « *A review of flywheel energy storage system technologies and their applications* », Applied science, Vol. 7, N°.286; doi:10.3390/app7030286.
- [29] S. Khare, M. D. Amico, C. Knight, S. McGarry (2012) « *Selection of materials for high temperature latent heat energy storage* », Solar energy materials & solar cells, N°. 107, pp. 20-27.
- [30] B. Multon, G. Robin, E. Erambert, H.B. Ahmed (2004) « *Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires* », Colloque Energie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications, pp. 64-77.
- [31] R. Kabouche, S. Harrouni, A. Talha (2012) « *Etude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie photovoltaïque* », Revue des énergies renouvelables, pp. 115 – 129.
- [32] D. Meekhum (2010) « *Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fils autonomes pour l'application aéronautique* », Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [33] L. M. Jacquelin, A. G. Bader (2013) « *Le stockage souterrain de l'énergie* », Géosciences, pp.100-107.
- [34] G. Dillenseger (2004) « *caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours* », Thèse de doctorat, Université Montpellier II.