

L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PHOTOVOLTAÏQUE ET SON STOCKAGE DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES

II.1	Introduction	10
II.2	L'énergie électrique photovoltaïque	11
II.2.1	Considérations générales sur les sources d'énergie renouvelables	11
II.2.2	Production d'électricité à partir de l'énergie solaire	12
II.2.2.a	<i>Les modules solaires photovoltaïques</i>	12
II.2.2.b	<i>Le champ photovoltaïque intégré</i>	13
II.2.2.c	<i>Applications et considérations économiques [II-11]</i>	13
II.2.3	Conclusion	14
II.3	Le stockage de l'énergie électrique photovoltaïque	15
II.3.1	Les systèmes raccordés au réseau	15
II.3.1.a	<i>Le réseau interconnecté</i>	15
II.3.1.b	<i>Les mini-réseaux ou réseaux isolés</i>	16
II.3.2	Les systèmes autonomes, isolés	17
II.3.3	L'hybridation des systèmes de stockage	18
II.3.4	Conclusion	19
II.4	Les technologies de stockage d'énergie électrique	20
II.4.1	Principe général de fonctionnement d'une batterie	20
II.4.2	Les batteries au Plomb	22
II.4.2.a	<i>Le fonctionnement des batteries au plomb [II-7]</i>	22
II.4.2.b	<i>Les différents types de batteries au plomb</i>	23
II.4.2.c	<i>Performances techniques</i>	24
II.4.2.d	<i>Contexte industriel et économique</i>	25
II.4.3	Les batteries au lithium	25
II.4.3.a	<i>Les différents types de batteries au lithium</i>	25
II.4.3.b	<i>Performances techniques</i>	27
II.4.3.c	<i>Contexte industriel et économique</i>	28
II.4.4	Conclusion	28
	Références bibliographiques	29

II.1 Introduction

La plupart de l'électricité produite dans le monde (82 %, [II-5], [II-11]) provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires. Bien que le gisement planétaire des combustibles fossiles soit très large, il est néanmoins limité. De plus, leur renouvellement n'est pas observable à l'échelle temporelle de l'homme. Enfin, l'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est notable, comme la production de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique (CO₂) ou de déchets radioactifs.

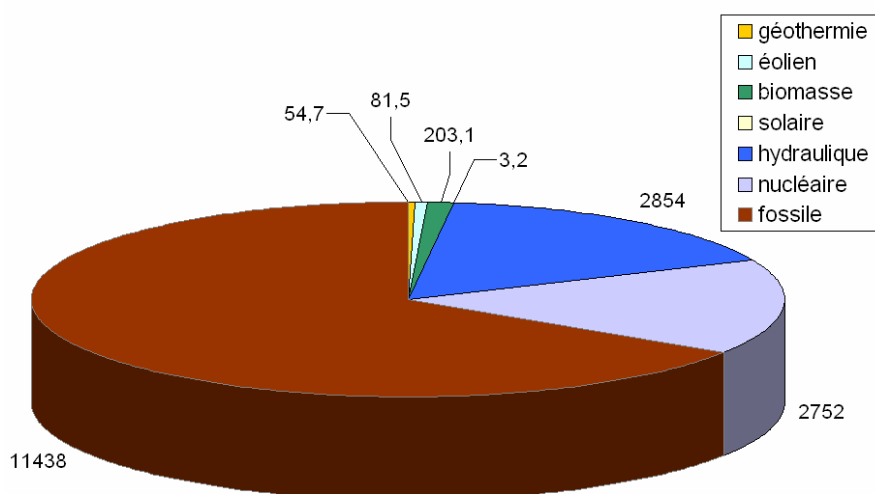


Figure II-1 : répartition des ressources sur la production mondiale d'électricité en 2004 (17390 TWh au total) [II-5].

L'utilisation de sources propres et renouvelables semble apporter une réponse convaincante mais partielle au problème énergétique actuel. L'hydroélectricité existe depuis près d'un siècle et constitue environ 16 % de la production mondiale d'électricité. Néanmoins, ce mode de production reste centralisé et localisé aux endroits où le potentiel présente un intérêt économique. En France, tous les sites répondant à ces critères sont déjà exploités. Ses perspectives de développement sont donc limitées.

Le concept d'« électricité décentralisée » (production de l'électricité sur le lieu même de son utilisation), a encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable. La tendance actuelle montre que l'intégration de ce type de ressources dans les systèmes électriques isolés (systèmes insulaires, réseaux villageois) se fait en association avec l'utilisation des ressources conventionnelles, tels les générateurs diesel. Enfin, l'ajout d'un dispositif de stockage d'énergie est parfois nécessaire pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur, quand la ressource renouvelable ne peut le faire.

II.2 L'énergie électrique photovoltaïque

II.2.1 Considérations générales sur les sources d'énergie renouvelables

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables¹ disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

Depuis les années 1990, les énergies renouvelables (autres que l'hydroélectricité) connaissent un essor important. Depuis 1994 dans l'Union Européenne, le taux de croissance annuel pour l'éolien est d'environ 34 % et d'environ 30 % pour le solaire (principalement pour des applications connectées au réseau) [II-5]. Fin 2004, la puissance éolienne installée en Europe s'élève à 34,4 GW et la puissance crête² photovoltaïque s'élève à 1,1 GW_{crête} (voir Tableau II-1).

Les politiques de développement durable mises en place dans le monde ont permis une meilleure exploitation du vaste potentiel que représentent les ressources renouvelables.

L'indépendance énergétique, couplée à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et la volonté de diversification des ressources, ont été les moteurs d'un développement industriel très conséquent, permettant d'initier des filières nouvelles tout en soutenant des technologies plus matures. Les perspectives économiques du domaine des énergies renouvelables sont en outre confortées par le contexte d'appauvrissement des énergies fossiles.

Ressource renouvelable	Capacité installée / Production d'électricité dans l'Union Européenne
Eolienne	34,4 GW / 57 TWh
Solaire	Photovoltaïque : 1,1 GW _{crête} (dont 92 % connectés au réseau) / 650 GWh _e
	Thermique : 10,7 GW _{th} ³ (15 millions de m ²)
Géothermie	électricité : 0,8 GW _e ⁴ / 5,5 TWh _e chaleur : 2 GW _{th}
Petite hydraulique (installations de taille < 10 MW)	11,6 GW
Biomasse	Bois 55,4 Mtep ⁵ ; électricité : 34600 GWh _e chaleur : 435000 GWh _{th}
	Biogaz (valorisation des déchets)

Tableau II-1 : bilan des ressources d'énergie renouvelables dans l'Union Européenne fin 2004 [II-4], [II-5].

¹ dont l'utilisation n'induit aucune diminution du gisement à cours ou long terme.

² c'est la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m² à l'horizontale, température ambiante de 25°C, masse d'air optique (AM) égale à 1,5.

³ GW_{th} : gigawatts thermiques.

⁴ GW_e : gigawatts électriques.

⁵ Mtep : megatonnes équivalent pétrole.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les éléments ayant traités à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

II.2.2 Production d'électricité à partir de l'énergie solaire

L'énergie solaire représente un gisement très important au niveau de la surface du globe terrestre. La cartographie ci-après présente le rayonnement solaire global annuel en Europe. On constate qu'en France, la quantité d'énergie solaire annuellement disponible varie entre environ 1000 et 1400 kWh/m². Cette énergie peut être convertie en chaleur à l'aide de modules solaires thermiques ou en électricité à l'aide de modules solaires photovoltaïques, dont le fonctionnement est défini dans le paragraphe suivant.

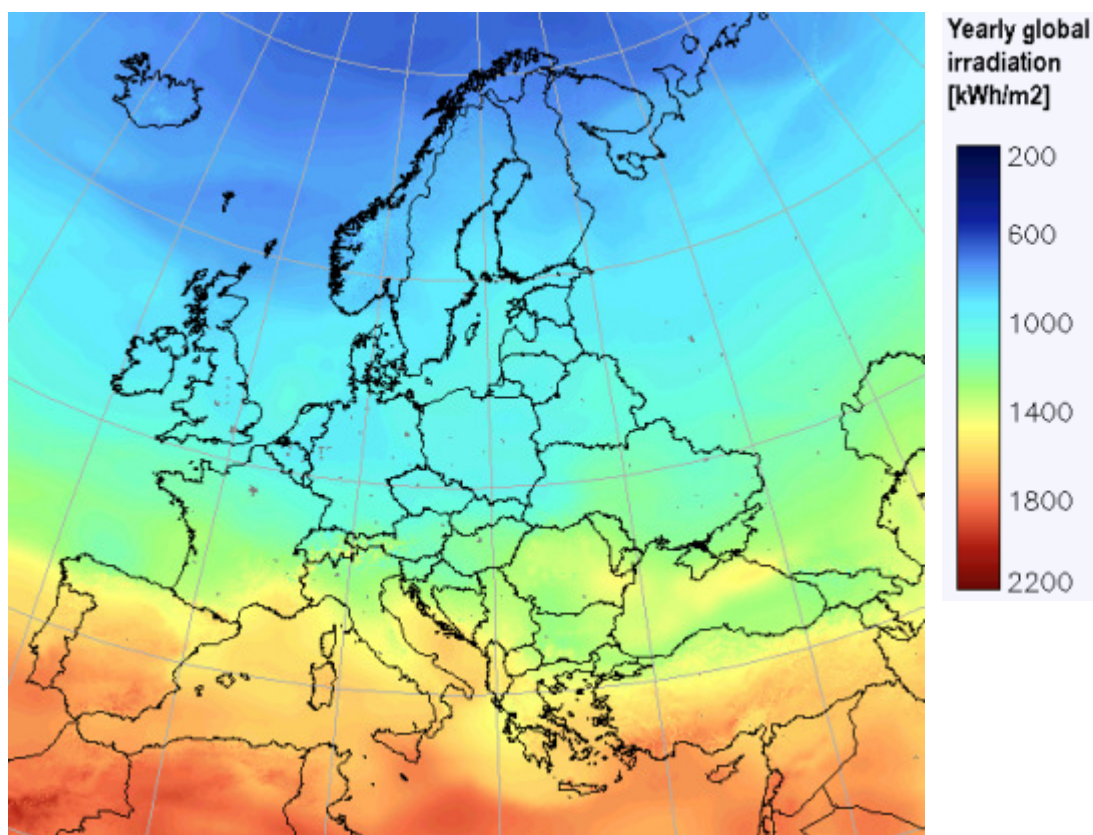


Figure II-2 : carte du rayonnement solaire global annuel dans un plan horizontal en Europe ; données moyennées sur la période de 1981 à 1990 [II-2].

II.2.2.a Les modules solaires photovoltaïques

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus 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 de fonctionner comme un générateur.

Les modules solaires photovoltaïques (PV) sont constitués d'un assemblage série/parallèle de cellules élémentaires, permettant d'ajuster leur tension et courant caractéristiques.

Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre de 10 % (13 à 14 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe).

Un champ photovoltaïque ou champ solaire est constitué d'un ensemble de modules connectés en série et/ou en parallèle. On protège les modules avec des diodes by-pass (Schottky) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci.

Le choix de la caractéristique du champ solaire dépend du point de fonctionnement requis par les composants associés (batteries, convertisseurs, électrolyseur, etc.).

II.2.2.b Le champ photovoltaïque intégré

Pour intégrer les modules au niveau système, le champ PV peut être associé à un organe MPPT (Maximum Power Point Tracking). Il permet d'ajuster, en chaque instant, la puissance électrique fournie par le champ à sa valeur maximale (dans les conditions d'ensoleillement et de température de l'instant considéré) en déplaçant le point de fonctionnement du module sur sa courbe caractéristique.

Deux types de convertisseurs électriques peuvent être utilisés pour la connexion du champ au système dans lequel il est intégré.

Le convertisseur DC/DC (hacheur élévateur ou abaisseur de tension, selon le niveau de tension cible) permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun.

L'onduleur (convertisseur DC/AC) sera utilisé lorsque le champ PV est raccordé au réseau électrique ou dans les systèmes incluant un bus alternatif.

II.2.2.c Applications et considérations économiques [II-10]

Le coût d'un module photovoltaïque s'élève à environ 3 €/W_{crête} [II-9]. En incluant les coûts d'installation ainsi que des coûts additifs (électronique, convertisseurs...), le coût total d'un système photovoltaïque s'élève à environ 6 €/W_{crête}. Les constructeurs garantissent généralement ces systèmes pour une durée de vie de 20 ans voire 30 ans.

Les faibles rendements de conversion électrique des modules photovoltaïques impliquent généralement l'installation de grandes surfaces pour assurer la production d'électricité nécessaire à l'autonomie d'un système ayant un générateur PV comme source principale d'énergie. Le coût élevé des modules limite leur utilisation à des applications spécifiques nécessitant une alimentation fiable, tels les sites isolés pour lesquels le raccordement à un réseau de distribution est soit impossible (parce qu'inexistant), soit trop coûteux (parce que trop éloigné).

Depuis quelques années, plusieurs arguments sociopolitiques ont encouragé la production décentralisée d'électricité :

- le contexte énergétique global de réduction des émissions de gaz à effet de serre,
- les directives européennes sur l'utilisation des sources d'énergie renouvelables,
- la dérégulation du marché de l'électricité.

Dans ce cadre, apparaissent désormais des installations PV à petite échelle comme l'équipement de toits d'habitats individuels ou collectifs. Ce concept de microgénération devient progressivement rentable en quelques années.

En France, l'arrêté ministériel du 10 juillet 2006 fixe le tarif de rachat à 30 c€ HT par kWh électrique photovoltaïque et 55 c€/kWh_e HT pour les champs PV intégrés au bâti.

Les installations de grande puissance, moins nombreuses, tendent à se multiplier. La plus grande installation à ce jour a été inaugurée en septembre 2006, à Arnstein en Allemagne : 12 MW_{crête} installés sur plus de 70 hectares. La capacité de production de cette usine est estimée à environ 14 GWh_e annuels.

Un projet portugais, Serpa Solar Power Plant, d'une taille comparable (11 MW_{crête} sur 60 hectares) est en cours de fabrication.

Le site de Serre, en Italie, opérationnel depuis 1990 produit 4,6 GWh_e annuels avec 3,3 MW_{crête} de PV installés (32000 m² de modules, P_{crête} = 105 W_{crête}/m²).

Le prix de production très élevé du PV est le principal frein économique à son essor sur le marché mondial. Les installations à petite et moyenne échelle constituent un marché très important. Ce sont d'ailleurs elles qui, aujourd'hui, contribuent le plus au développement des filières industrielles photovoltaïques. En 2005, la croissance photovoltaïque en Europe a été d'environ 18 %, avec 645 MW_{crête} installés dans l'année portant la capacité totale à environ 1800 MW_{crête} [II-3]. Fin 2005, on pouvait estimer la puissance photovoltaïque mondiale cumulée à environ 3700 MW_{crête} dont 85 % connectés au réseau [II-14].

II.2.3 Conclusion

En définitive, les atouts de la technologie photovoltaïque qui contribuent à favoriser son emploi sont :

- le gisement solaire mondial potentiellement important,
- sa fiabilité et sa robustesse (pas de pièces en mouvement),
- sa modularité (souplesse du dimensionnement),
- son impact environnemental quasiment nul, hors recyclage (aucune émission sonore).

En contrepartie, deux inconvénients majeurs viennent nuancer les bienfaits de l'utilisation de cette technologie :

- sa faible puissance spécifique due à un faible rendement de conversion (grandes surfaces installées),
- son prix élevé (investissements conséquents).

II.3 Le stockage de l'énergie électrique photovoltaïque

Le mode d'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes électriques dépend de la nature du système considéré, selon qu'il est raccordé au réseau ou isolé [II-6]. Dans chaque cas, le stockage de l'électricité produite à partir de la source renouvelable peut s'avérer nécessaire pour différentes raisons.

II.3.1 Les systèmes raccordés au réseau

On peut distinguer deux types de réseaux : le réseau interconnecté et les mini-réseaux ou réseaux isolés. Dans chacun des cas, le stockage d'électricité est envisageable. Les bénéfices apportés par la présence d'unités de stockage dépendront directement de leur mode d'utilisation de leur implantation dans le réseau.

II.3.1.a Le réseau interconnecté

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 à des tarifs garantis et avantageux.

Cette intégration peut se faire au niveau des lignes de distribution (réseau basse tension). Cependant, un déploiement local très concentré peut engendrer des perturbations et générer des écarts de tension ou de fréquence du signal alternatif. Les générateurs photovoltaïques sont alors déconnectés permettant de compenser les déséquilibres occasionnés sur la ligne de distribution (voir Figure II-3).

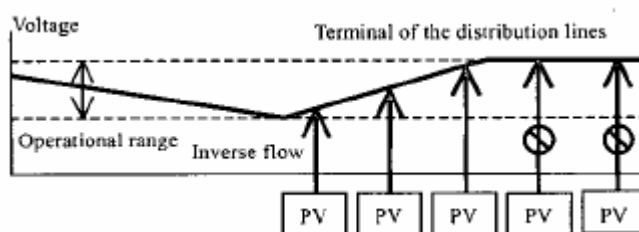


Figure II-3 : déconnexion des générateurs PV en raison du déséquilibre de la tension sur la ligne de distribution.

Des unités de stockage placées en certains nœuds du réseau participeront au réglage de la fréquence du signal à travers un équilibre « production - consommation » et à la qualité de tension afin qu'elle ne dépasse pas les marges opérationnelles.

On peut citer à titre d'exemple le projet d'intégration de générateurs PV en milieu urbain [II-12], à Ota City (Japon), financé par l'Organisation pour le Développement des Energies Nouvelles et Technologies Industrielles (NEDO).

En juin 2006, environ 550 systèmes domestiques composés d'un champ PV de 4 kW_{crête} et d'un stockage (batteries au plomb) d'une capacité d'environ 9 kWh ont été installés.

La figure ci-après présente une option d'intégration du champ PV parmi les différentes solutions envisagées dans ce projet.

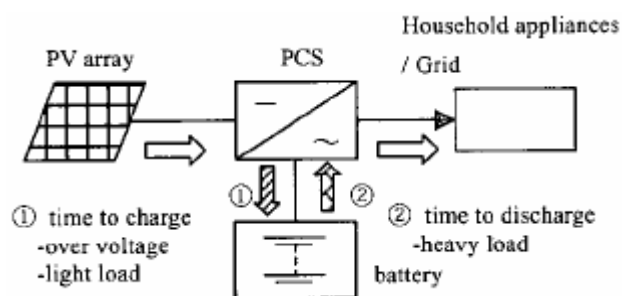


Figure II-4 : intégration d'unité de stockage pour éviter la restriction de la production des générateurs PV [II-12].

Lorsque la production photovoltaïque le permet, l'utilisateur est alimenté par le champ PV. L'excédent de production est alors stocké dans les batteries. Le convertisseur de puissance (PCS) est télécommandé par un contrôleur qui régule la production selon la qualité de la ligne de distribution.

Le stockage utilisé ici est constitué de batteries au plomb. Cette technologie, comme nous le verrons par la suite, est très bien adaptée au stockage de faible capacité avec une utilisation quotidienne. Des technologies de batteries plus performantes pourraient être envisagées, comme les batteries au nickel. Néanmoins leur coût est bien plus élevé (de 300 à 650 €/kWh contre environ 150 €/kWh pour les batteries au plomb). Leur utilisation engendrera des dépenses supplémentaires, acceptables pour des installations nécessitant une grande fiabilité.

II.3.1.b Les mini-réseaux ou réseaux isolés

Les réseaux isolés (par exemple, un réseau îlien) 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.

Parmi les générateurs renouvelables installés, les turbines éoliennes sont très fréquemment rencontrées. Cependant, l'intégration de générateurs photovoltaïques s'est fortement répandue ces dernières années.

L'énergie photovoltaïque ne peut généralement pas être entièrement absorbée. On limite la pénétration des sources renouvelables entre 15 et 30 % de l'énergie totale du réseau pour éviter tout risque de déséquilibre dû à l'intermittence de la source.

Une unité de stockage peut dans ce cas permettre une meilleure gestion de la ressource. En fiabilisant la production des générateurs renouvelables, leur taux de pénétration dans ce type de réseau pourra être augmenté.

On peut attendre des bénéfices supplémentaires au niveau des générateurs diesel. Pour maximiser leur rendement et leur durée de vie, ils doivent fonctionner autour de leur puissance nominale. La présence d'unités de stockage prenant en charge l'excédent d'énergie produit, autorisera alors ce mode de fonctionnement.

Au niveau du réseau, le stockage permet d'assurer le lissage de charge et l'écrêtage des pointes de puissance [II-8]. Ces deux opérations sont caractérisées par des sollicitations différentes en terme de durée et de capacité énergétique.

Le lissage de charge peut intervenir sur une dizaine d'heures pendant lesquelles le stockage est sollicité sur une grande étendue de sa capacité. Les systèmes utilisés peuvent être des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ou des unités de stockage pneumatique (Compressed Air Energy Storage). Les puissances installées sont très importantes (quelques dizaines de MW) pour des capacités de plusieurs dizaines de MWh.

La réduction des pointes de puissance intervient pour des durées plus courtes, de l'ordre de quelques minutes. Les capacités mises en jeu sont plus faibles que dans le cas précédent. Le temps de réponse des unités de stockage doit dans ce cas être très rapide. Les technologies telles que les volants d'inertie et les supercapacités présentent cette caractéristique. Mais leur développement est encore relativement limité. Les batteries sont de même bien adaptées pour remplir cette fonction.

II.3.2 Les systèmes autonomes, isolés

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. Ils peuvent être composés d'un générateur diesel, d'un générateur photovoltaïque et d'un système de stockage d'électricité.

Les puissances photovoltaïques installées dans ce type de systèmes électriques s'étendent de 50 W_{crête} à 1 kW_{crête} pour une maison solaire ou un relais de télécommunications, de 1 à quelques kW_{crête} pour les phares et balises ou les stations de pompage d'eau. Les systèmes hybrides (associant un champ PV et un groupe électrogène) alimentant un unique usager ou une petite communauté dans le cas d'un village isolé, peuvent même atteindre en terme de puissance installée quelques dizaines à quelques centaines de kW_{crête}.

Dans le cas des systèmes comportant uniquement un générateur diesel, la présence du stockage n'est pas obligatoire. Mais elle permet une gestion plus souple et plus efficace du système, en rendant possible le choix des plages de fonctionnement du groupe électrogène où son rendement est optimal. Enfin, dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source « tampon », en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture.

Pour s'affranchir de l'utilisation d'une énergie fossile, on peut envisager le remplacement du groupe électrogène par une pile à combustible de technologie PEM (à membrane échangeuse de protons). Ce générateur produit de l'électricité à partir d'hydrogène. Il n'émet ni gaz à effet de serre ni bruit et atteint à sa puissance nominale des rendements de l'ordre de 45 à 50 %. Néanmoins, l'autonomie du système est liée à la capacité du réservoir d'hydrogène, qu'il faudra remplir régulièrement. Et le ravitaillement de l'installation peut s'avérer très coûteux selon son emplacement.

Dans les systèmes PV isolés sans générateur auxiliaire, la présence d'un dispositif de stockage d'électricité est alors indispensable pour pallier le caractère intermittent du générateur photovoltaïque. Sa principale fonction est d'accumuler l'électricité excédentaire produite par le générateur et, lorsque la production de ce dernier est déficitaire, de fournir le complément d'énergie nécessaire à l'utilisateur.

L'unité de stockage est dimensionnée de telle sorte que le système dans lequel il est intégré puisse continuellement fournir à l'utilisateur l'énergie dont il a besoin.

Dans le cas d'un fonctionnement journalier, le stockage se vide et se remplit sur une période de quelques jours. Ce mode de fonctionnement permet d'installer de faibles capacités énergétiques tout en préservant l'autonomie de l'utilisateur sur la période considérée. Certains systèmes de stockage peuvent fonctionner en mode saisonnier. La capacité installée est alors beaucoup plus importante puisque le stockage se vide et se remplit sur une, voire plusieurs saisons.

Les systèmes isolés utilisent en grande majorité les batteries au plomb comme stockage d'énergie. Cette technologie (détaillée dans le paragraphe II.4.2) bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Cependant ce composant reste délicat à utiliser. Son emploi est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité.

Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Elles fonctionnent donc en mode journalier. Mais des cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Son état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée.

Ainsi, quand l'état de charge des batteries est trop élevé et que la production photovoltaïque est excédentaire, le champ PV doit être temporairement déconnecté. Le surplus d'énergie disponible à ses bornes ne peut donc être stocké. Si la taille des batteries est bien adaptée aux besoins de l'utilisateur, cette quantité inutilisée revient à considérer que le champ PV doit inévitablement être surdimensionné pour satisfaire à l'autonomie du système.

II.3.3 L'hybridation des systèmes de stockage

Les caractéristiques techniques des systèmes de stockage peuvent entraîner d'importantes contraintes de fonctionnement et réduire leur domaine d'utilisation. Le couplage ou hybridation de technologies ayant des propriétés complémentaires est dans certains cas nécessaire pour contourner les difficultés liées à l'utilisation d'un dispositif unique.

Par exemple, le démarrage d'une unité de stockage d'énergie à base d'hydrogène⁶ (USEH) se fait en à peu près 1 minute. Ce régime transitoire ne lui permet pas d'être utilisé seul comme système de stockage d'énergie. Il faut alors envisager de l'associer à un dispositif dont l'énergie est disponible instantanément. Une supercapacité pourra par exemple assurer la fourniture d'électricité à l'utilisateur pendant la mise en marche des différents composants de l'USEH.

Les deux unités de stockage ont un dimensionnement équivalent en puissance, mais pas en énergie. La supercapacité ne fonctionnera que pendant un court instant. Sa capacité est donc relativement faible devant celle de l'USEH qui fonctionnera en tant que principal dispositif de stockage. En outre, si un problème important est rencontré au niveau de son fonctionnement, la procédure d'arrêt d'urgence est engagée. Les batteries pourront donc fournir l'énergie nécessaire à la mise en sécurité du système.

L'hybridation du stockage peut aussi conduire à améliorer les performances du système électrique. Une bonne stratégie de gestion de l'énergie permettra de faire fonctionner les différentes unités de stockage dans des plages où leur rendement est maximisé.

⁶ composée d'un électrolyseur, d'une pile à combustible et d'un réservoir de stockage de gaz.

On peut hybrider l'USEH avec des batteries de faibles capacités, respecter leur mode propre de fonctionnement (journalier pour les batteries et saisonnier pour l'USEH) tout en maximisant leur rendement.

Dans le cas des systèmes autonomes, nous avons vu que la déconnexion du champ PV, lorsque les batteries atteignent un état de charge trop élevé, ne permettait pas de stocker toute l'énergie photovoltaïque productible. Avec un système de stockage hybride bien dimensionné et une gestion efficace de l'énergie, on pourra alors maximiser l'utilisation de l'énergie produite par le champ PV et donc accroître l'efficacité et la rentabilité du système global.

Enfin, dans le cas de systèmes photovoltaïques implantés en concentration importante sur une même ligne de distribution, l'intégration d'un stockage hybride peut se faire de manière découplée. De petites unités de stockage court terme peuvent être installées au niveau du consommateur (de façon décentralisée) tandis que le stockage long terme, dont la taille est plus importante, peut être centralisé en un point du réseau.

II.3.4 Conclusion

Bien qu'il ne soit pas incontournable dans la plupart des systèmes électriques, le stockage d'électricité engendre différents bénéfices selon le cadre de son application. En particulier il peut fiabiliser l'intégration de l'énergie photovoltaïque et accroître son taux de pénétration dans les réseaux interconnectés.

Pour les systèmes autonomes utilisant une source renouvelable comme seul apport d'énergie, la présence du stockage est indispensable pour pallier l'intermittence de la production d'électricité. Le choix de la technologie employée se porte généralement sur les batteries au plomb. Cependant, cette option n'est pas totalement satisfaisante en raison de certaines contraintes liées à leur fonctionnement. Leur hybridation avec un stockage longue durée peut alors constituer une solution alternative.

On peut aussi considérer leur remplacement, à moyen terme, par des technologies plus innovantes telles que les batteries au lithium ou le stockage d'énergie à base d'hydrogène (USEH). Certaines de leurs caractéristiques techniques constituent des atouts essentiels pour leur utilisation dans les systèmes stationnaires.

II.4 Les technologies de stockage d'énergie électrique

Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à confiner, telle l'énergie chimique par exemple. Seuls le stockage électromagnétique et le stockage électrostatique stockent l'électricité sous forme de charges électriques.

Comme nous l'avons vu précédemment, le stockage électrochimique est largement employé dans les applications stationnaires. Après un bref rappel du fonctionnement de ce type de stockage, nous détaillerons les principales caractéristiques des batteries au plomb. Cette technologie possède un retour d'expérience de plus de cinquante ans, notamment grâce aux applications automobiles. Son faible coût et son excellent taux de recyclabilité en font un acteur incontournable du stockage dans les systèmes électriques.

Les batteries au lithium seront ensuite évoquées. Cette technologie prometteuse fait l'objet de nombreux efforts de R&D. Bien qu'ayant atteint une certaine maturité dans le domaine des applications portables, ce type d'accumulateurs est encore peu utilisé dans les applications stationnaires mais représente une solution de remplacement intéressante de la technologie au plomb, à moyen terme.

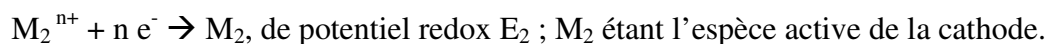
II.4.1 Principe général de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques.

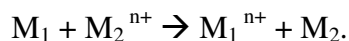
A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'*oxydation* selon la formule suivante :



Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de *réduction* selon :



L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



La force électromotrice E de ce convertisseur se calcule selon : $E = E_2 - E_1$.

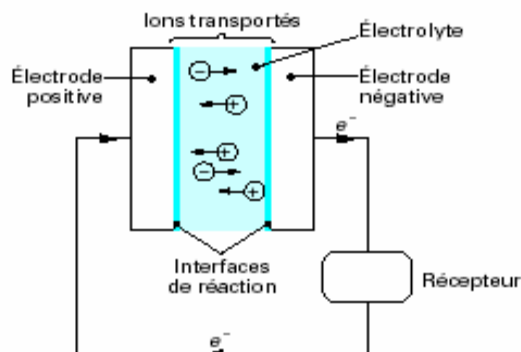


Figure II-5 : principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.

La Figure II-5 présente le fonctionnement d'un accumulateur en décharge. A la différence des piles électrochimiques, les réactions d'oxydoréduction intervenant dans les batteries sont inversables. On peut donc, à l'aide d'une source extérieure, fournir du courant à la batterie qui fonctionnera alors en charge et les réactions s'effectueront inversement.

La capacité (en Ah) du convertisseur électrochimique est directement liée à la quantité des matières actives mises en jeu dans la réaction d'oxydoréduction. Elle confère en outre au convertisseur son rôle d'accumulateur d'énergie, dont l'expression est, en chaque instant, le produit de la capacité (chargée ou déchargée) et de la tension aux bornes de l'accumulateur.

Pour obtenir l'énergie massique ou volumique stockée la plus importante, on a recours aux espèces présentant le potentiel redox le plus élevé possible et dont les réactions d'oxydoréduction font intervenir le maximum d'électrons pour une même masse ou un même volume de matière.

Un assemblage série / parallèle des cellules élémentaires à surface variable permettra d'ajuster la tension et la capacité de la batterie.

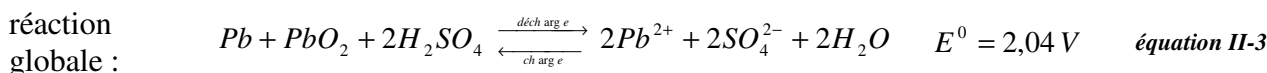
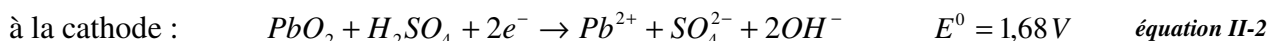
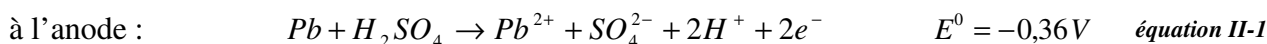
La technologie des accumulateurs est très diversifiée. On peut citer les principaux types :

- les accumulateurs au plomb ;
- les accumulateurs au nickel à électrolyte alcalin (KOH), nickel/cadmium, nickel/hydrure métallique, nickel/hydrogène, nickel/fer ;
- les accumulateurs alcalins nickel/zinc et MnO_2 /zinc ;
- les accumulateurs alcalins métal/air : air/zinc, air/fer, air/magnésium ;
- les accumulateurs scellés au sodium à électrolyte solide en alumine fonctionnant à haute température ($300^\circ C$) : sodium/soufre, sodium/chlorure de nickel ;
- les accumulateurs au lithium à électrolyte sel fondu à $450^\circ C$: $LiAl/FeS$ ou FeS_2 ;
- les accumulateurs au lithium fonctionnant à température ambiante dont l'électrode positive est un composé d'insertion dans un oxyde métallique :
 - à électrolyte polymère solide et anode de lithium métallique en films minces Li/MO_x ;
 - ou à électrolyte organique liquide ou polymère plastifié avec électrode négative à insertion Li_xC_6/MO_y ;
- les « systèmes Redox » Zn/Br ou au vanadium utilisant des électrodes liquides (catholytes ou anolytes).

II.4.2 Les batteries au plomb

II.4.2.a Le fonctionnement des batteries au plomb [II-7]

Il est basé sur la réaction d'oxydoréduction suivante :



Lors de la **décharge**, le plomb de l'électrode négative s'oxyde en Pb^{2+} et perd deux électrons (équation II-1). A la cathode, l'oxyde de plomb PbO_2 gagne deux électrons lors de sa réduction en Pb^{2+} (équation II-2). Les protons produits à l'anode et les ions hydroxydes produits à la cathode se recombinaient en eau H_2O (équation II-3).

Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

- transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive (PbO_2) en cristaux de sulfate de plomb ;
- gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive ;
- passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.

Lors de la **charge**, les réactions inverses des précédentes se produisent.

Typiquement, la tension de cellule évolue en charge et en décharge de la manière suivante :

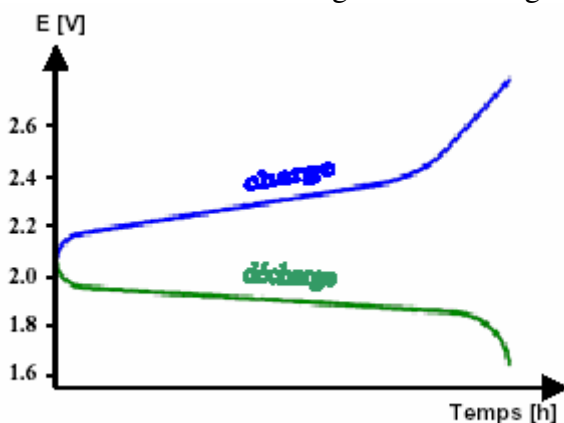
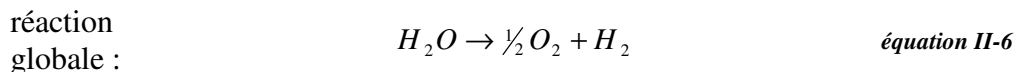
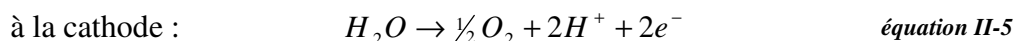
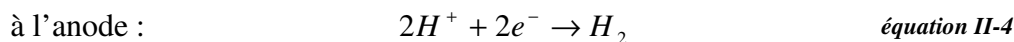


Figure II-6 : courbes de charge et de décharge d'une cellule élémentaire de batterie au plomb.

Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4 V, valeur seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène O_2 gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène H_2 gazeux à l'électrode négative.

Ce phénomène dit de *dégazage* est caractérisé par les réactions suivantes aux électrodes :



La densité théorique d'énergie de ce couple électrochimique est de 170 Wh/kg. Cependant, le sulfate de plomb produit par les réactions aux deux électrodes est *insoluble* et *non conducteur*. Son accumulation sur les électrodes, et dans une moindre mesure dans l'électrolyte, limite par conséquent l'énergie qui peut être extraite de la batterie. De plus, les concentrations et les quantités de masses actives sont inférieures à celles conduisant à cette valeur. La densité pratique d'énergie est proche de 40 Wh/kg, soit quatre fois moins que le maximum théorique.

II.4.2.b Les différents types de batteries au plomb

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vented Batteries) et les batteries scellées (Valve Regulated Lead Acid Batteries).

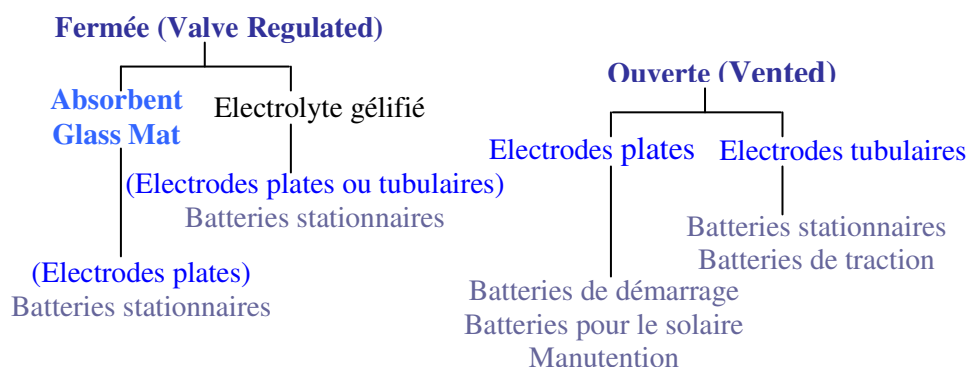


Figure II-7 : les différents types de batteries au plomb [II-13].

II.4.2.b.i Batteries « classiques » ou ouvertes.

Pour ce type de batteries, la cellule n'est pas fermée. La quantité d'électrolyte (composé typiquement de 65 % d'eau et 35 % d'acide sulfurique) peut diminuer en raison des occurrences successives du phénomène de gassing ainsi que de l'évaporation naturelle. La batterie nécessite donc une maintenance au cours de laquelle le niveau de l'électrolyte doit être réajusté avec de l'eau déionisée pour le bon fonctionnement de l'accumulateur.

Enfin, ces batteries doivent se trouver dans un emplacement suffisamment ventilé car le dégagement gazeux qu'elles peuvent produire devient explosif lorsque la proportion d'hydrogène dans l'air atteint 4 % en volume.

II.4.2.b.ii Batteries VRLA (Valve Regulated Lead-Acid).

Ces batteries sont aussi appelées batteries « sans entretien ». Ici, la cellule est fermée. L'électrolyte y est immobilisé sous forme de gel (ajout de silice à haute surface spécifique), ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat). Les gaz produits durant le gassing restent donc « prisonniers » dans le gel et sont recombinaés (reconsommés) durant la décharge. La consommation d'eau et l'émission de gaz sont donc extrêmement faibles.

Il existe deux types principaux de technologies concernant l'électrode positive PbO_2 : celle-ci peut être soit une plaque plane, soit tubulaire. Les plaques planes sont constituées de grilles formées d'un alliage de plomb auquel on ajoute 5% d'antimoine, le tout enrobé dans de la matière active. Cette disposition permet des puissances supérieures grâce à l'augmentation des surfaces d'échange électrode/électrolyte. Par contre, pour les plaques tubulaires, la matière active est emprisonnée dans des gaines poreuses. La transmission du courant est alors assurée par des épines de plomb disposées dans ces gaines. Cette technologie permet d'augmenter la durée de vie, spécialement en cyclage profond, mais à un prix de revient plus important.

II.4.2.c Performances techniques

Le tableau suivant résume les principales données techniques des accumulateurs au plomb.

Température de fonctionnement	-20 à +50 °C
Énergie	25/45 Wh/kg 60/120 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	300/1500
Puissance massique	80/150 W/kg
Rendement⁷	<ul style="list-style-type: none"> • énergétique : de 60 à 95% • faradique : de 65 à 100%
Auto-décharge	2 à 10 % par mois à 25°C
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • surveiller le niveau d'eau pour les batteries (ouvertes) non étanches tous les 2 mois • sulfatation de l'électrolyte en cas de stockage prolongé ⇒ brassage
Impact environnemental	Le plomb est toxique ⇒ recyclage (≅ 100%) par réduction des oxydes de plomb et tri pneumatique ou hydraulique des plastiques (polypropylène)
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • acide sulfurique : corrosif • problèmes de surpression de l'hydrogène en cas de surcharge

Tableau II-2 : principales données techniques de la batterie au plomb.

⁷ Rendement : ① énergétique = énergie effectivement disponible en décharge / énergie injectée dans la batterie au cours de la charge ;
 ② faradique = capacité en décharge / capacité en charge.

II.4.2.d Contexte industriel et économique

Le marché de la batterie au plomb est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage (SLI, Starting Lighting Ignition) ainsi que la plupart des batteries stationnaires. Les industriels sont par conséquent très nombreux dans le monde entier : Panasonic, Hawker ou GP Batteries, CEAC, Fulmen ou Varta. Le marché est donc très concurrentiel.

Le coût des accumulateurs au plomb varie entre 50 et 150 Euros/kWh, qui est un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie.

Le taux de recyclabilité de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb.

II.4.3 Les batteries au lithium

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage.

Les efforts menés en matière de recherche et de développement ont permis de voir apparaître de nouvelles technologies de stockage électrochimique comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène (développé dans le chapitre suivant), ou les batteries au lithium, développées dans ce paragraphe.

L'élément lithium présente des caractéristiques physico-chimiques intéressantes :

- fort potentiel redox : $E_{Li/Li^+} = - 3,04 \text{ V}_{/ENH}$;
- masse molaire faible : $M = 6,94 \text{ g/mol}$;
- capacité massique = $3,87 \text{ Ah/g}$.

Utilisé comme matière active à l'anode, il permet d'obtenir des batteries à fort potentiel énergétique. Mais sa réactivité avec le milieu ambiant (notamment avec l'air) en fait un matériau difficile à manipuler à l'état métallique.

II.4.3.a Les différents types de batteries au lithium

Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère.

II.4.3.a.i *Les batteries Lithium métallique*

La technologie « Lithium métallique » est de moins en moins explorée du fait de problèmes de sécurité qu'elle engendre. Pour contourner cette difficulté, des matériaux « hôtes » ont été développés, permettant d'accueillir dans leur structure l'élément lithium à l'état ionique.

II.4.3.a.ii Les batteries Lithium-Ion

Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité (voir Figure II-8). Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode.

L'électrode positive est constituée d'un oxyde du type LiMO_2 . Actuellement, trois de ces oxydes sont utilisés dans ces batteries : LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4 . Le séparateur est constitué d'une membrane polymère microporeuse et l'électrolyte est une solution de LiPF_6 dans un mélange de solvants organiques.

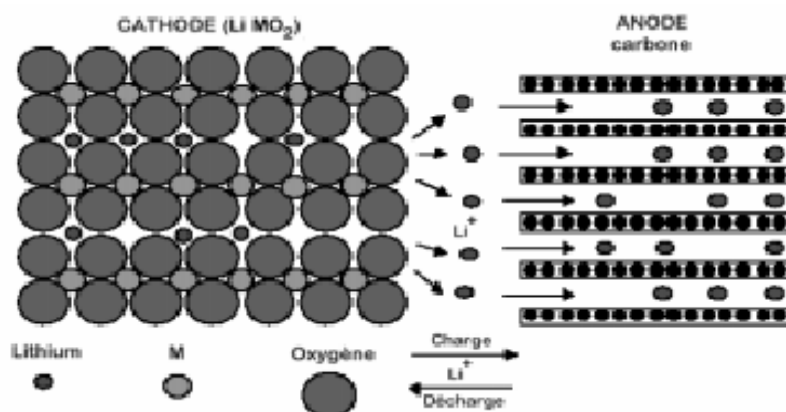


Figure II-8 : schéma de principe de la batterie Li-Ion.

Leurs énergies massique et volumique sont très élevées, de l'ordre de respectivement 120 Wh/kg et 200 W/kg.

La tension varie quant à elle de manière assez linéaire avec la profondeur de décharge, et est relativement peu influencée par la température ainsi que par la puissance de décharge. Cette caractéristique peut être mise à profit pour l'estimation de l'état de charge.

Le respect des tensions de fin de charge est primordial pour préserver la durée de vie de la batterie et pour éviter tout problème de sécurité. En effet, en cas de surcharge, la structure des électrodes peut être modifiée de manière irréversible et l'on peut assister à la création d'un dépôt de lithium métallique, ce qui conduit à la détérioration de l'accumulateur voire à son inflammation si le lithium entre en contact avec l'air.

II.4.3.a.iii Les batteries Lithium-polymère

Afin d'augmenter la densité d'énergie ainsi que la sécurité et la durée de vie des batteries au lithium, le remplacement de l'électrolyte liquide par un électrolyte solide a été envisagé. Les risques de contacts directs anode/cathode sont ainsi évités et la matrice d'insertion en carbone peut être supprimée augmentant la quantité d'énergie de la batterie. Ces batteries sont par conséquent fort compactes (Figure II-9) et présentent une énergie massique élevée (de l'ordre de 150 Wh/kg).

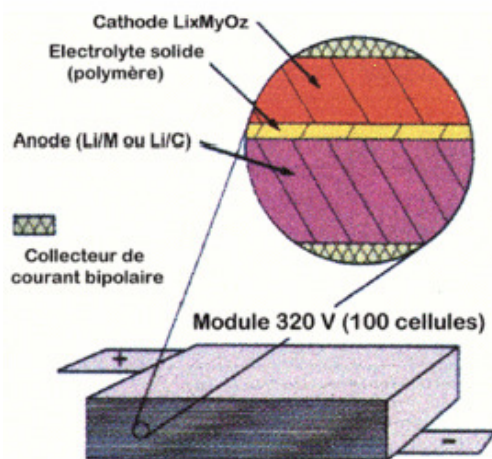


Figure II-9 : structure d'une batterie Lithium-polymère.

Les métaux utilisés à l'électrode positive sont le vanadium (V), le nickel (Ni), le manganèse (Mn) et le cobalt (Co). L'électrolyte polymère doit posséder de bonnes caractéristiques mécaniques. Sa conductivité ionique est améliorée par addition de sels conducteurs. Cependant, cette conduction reste faible et limite la puissance en décharge à environ 250 W/kg durant quelques secondes.

La tension lors de la décharge varie peu avec l'intensité du courant et cette tension peut alors être utilisée afin de fournir une estimation de l'état de charge. De plus, aucune réaction chimique secondaire n'a lieu durant la charge, ce qui explique les rendements énergétiques très élevés (entre 90 et 100 %).

II.4.3.b Performances techniques

Type	Li Ion (4V)	Li polymère (3V)
Température de fonctionnement	0 à +50 °C	+60 à +90°C
Énergie	80 à 120 Wh/kg 150 à 250 Wh/dm ³	100 à 150 Wh/kg 150 à 220 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	200 à 1000	300 à 600
Puissance massique permanente / 30s	50 à 200 W/kg	50 à 250 W/kg
Rendement charge / décharge	énergétique : de 85 à 100% faradique : de 90 à 100%	énergétique : de 90 à 100% faradique : de 90 à 100%
Auto-décharge	10 % par mois	2 semaines à chaud quelques % par an à froid
Impact environnemental	<ul style="list-style-type: none"> • sels de lithium et oxydes recyclés • solvants polymère et carbone inerté • utilisation du cobalt ⇒ très toxique 	
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • problème de stabilité mécanique (Li-Ion) • échauffement et risques d'explosion en surcharge (Li) • stockage longue durée : 30 à 50% du SOC 	

Tableau II-3 : performances des systèmes électrochimiques au lithium [II-6], [II-7].

II.4.3.c Contexte industriel et économique

Le coût des batteries au lithium s'échelonne de 700 à 1000 €/kWh. Les matières premières sont chères : graphite, cobalt, etc. Hormis les applications portables, les volumes de production sont encore très faibles, ce qui justifie des coûts encore très importants.

Les bonnes performances en terme de cycles et de plage de régime de décharge font des batteries au lithium un candidat potentiel pour des stockages court terme. Mais leurs nombreux inconvénients (recyclage, coût, performances à hautes températures, sécurité...) n'autorisent son utilisation qu'à très long terme.

II.4.4 Conclusion

Il existe une grande diversité de moyens de stockage d'énergie, chacun étant adapté à une application donnée. Les batteries au plomb répondent bien à la problématique du stockage courte durée dans les applications stationnaires isolées. C'est d'ailleurs la technologie la plus utilisée aujourd'hui pour ce type d'applications. Elles bénéficient d'un retour d'expérience de plus de cinquante ans. La production de masse des batteries de démarrage a permis d'atteindre des coûts très compétitifs, aujourd'hui quasiment incompressibles. Elles restent cependant perfectibles en terme de durée de vie (5 à 8 ans selon les conditions d'utilisation). Leur remplacement est envisagé à moyen ou long terme. Les batteries au lithium présentent des performances intéressantes. Mais elles nécessitent encore des développements conséquents avant d'envisager leur utilisation dans les systèmes électriques autres que portables et automobiles.

Les technologies de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique semblent en de nombreux points prometteuses. Nous tenterons dans le chapitre suivant de mettre en valeur les arguments favorables à l'utilisation de l'hydrogène comme moyen de stockage d'énergie pour applications stationnaires.

Références bibliographiques

- [II-1] *Données INES, <http://www.institut-solaire.com>.*
- [II-2] *Données PVGIS <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/pv/index.htm>*
- [II-3] *EurObserv'ER, "Baromètre du solaire photovoltaïque", Systèmes Solaires, n° 172, juin 2006.*
- [II-4] *EurObserv'ER, "Le baromètre européen 2005 des énergies renouvelables", 5^{ème} bilan, Systèmes Solaires, n° 165 à 170, 2005.*
- [II-5] *EurObserv'ER, "Seventh inventory of worldwide electricity production from renewable energy sources", 2005.*
- [II-6] *"Investigations on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies : Evaluation and recommended R&D strategy", INVESTIRE European project, 2003.*
- [II-7] *Linden D, "Handbook of Batteries and fuel cells", Mc Graw-Hill Inc, Third edition, 2002.*
- [II-8] *Marquet A & al., "Stockage d'électricité dans les systèmes électriques", Techniques de l'Ingénieur, traité D4030, 1998.*
- [II-9] *Messenger R et Ventre J, "Photovoltaic Systems Engineering", CRC Press, 1999.*
- [II-10] *Multon B, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur, traité D4005, 1999.*
- [II-11] *Multon B, "Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie", Techniques de l'Ingénieur, traité D3900, à paraître.*
- [II-12] *Nishikawa S, Kato K, "Demonstrative Research on Grid-interconnection of Clustered PV Power Generation Systems", 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11-18, 2003.*
- [II-13] *Ter-Gazarian A, "Energy storage for power systems", ISBN 0863412645, Peter Peregrinus Ltd., 1994.*
- [II-14] *"Trends in Photovoltaic Applications", Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T1-15, 2006.*

