

La problématique du stockage de l'énergie

J. DHERS

Académie des Technologies

I LE STOCKAGE DE L'ENERGIE

I-1 L'énergie est définie comme l'aptitude d'un corps à fournir un certain travail ou son équivalent (thermodynamique) à savoir la chaleur.

Le langage courant mélange sous ce terme plusieurs notions telles que sources d'énergie (dites aussi énergies primaires comme le charbon ou le pétrole), et énergies finales (celles que nous utilisons dans la vie courante) telles que l'énergie électrique, l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie chimique, etc. et les vecteurs d'énergie –qui ne sont pas forcément des énergies- mais qui permettent à l'énergie de transiter depuis les sources primaires jusqu'aux applications finales.

En général on utilise l'énergie (primaire ou finale) quand on en dispose, mais parfois on aimerait l'utiliser de façon différée d'où l'idée de vouloir la stocker. Il faut aussi pouvoir la déstocker. Le stockage n'a de sens que dans une dualité réversible de stockage/déstockage.

On stocke l'énergie pour pouvoir l'utiliser plus tard, mais à bon escient, c'est-à-dire
- **non seulement quand on en aura besoin (assurer de l'autonomie par exemple)**
- **mais aussi dans un contexte sociétal, quand on estimera qu'il est intéressant de l'utiliser parce que elle est soit économiquement profitable soit écologiquement intéressante.**

On voit tout de suite les limites de la faisabilité de l'opération : on peut ou on ne peut pas stocker l'énergie, ou en stocker suffisamment pour une application donnée.

On stocke facilement (moyennant néanmoins certaines précautions en grandes et petites quantités) des ressources fossiles carbonées comme le charbon, le pétrole, le gaz, qui sont des énergies primaires chimiques, d'autant plus facilement qu'elles sont en fait stockées dans le sol depuis des millénaires. Dans ce groupe citons aussi l'uranium. Remarquons que, à titres et degrés divers, ces énergies fossiles, potentielles, sont toutes des énergies polluantes.

Par contre on ne sait pas du tout stocker l'énergie solaire ou l'énergie éolienne, ou les énergies de la mer (marées, vagues, houles, courants marins) qui sont certes des énergies primaires mais qui sont avant tout des énergies renouvelables et intermittentes (de nature cinétique) et non polluantes.

On sait stocker la bio masse, du moins de façon temporaire, sous ses différents aspects (plus ou moins polluants) dont on tire plusieurs formes d'énergies finales ou de vecteurs d'énergie (biocarburants, électricité, gaz dont l'hydrogène, biogaz qui est à 80% du méthane).

On ne sait pas non plus stocker des énergies finales comme l'énergie électrique ou la chaleur, du moins en grande quantité. En fait électricité et chaleur ne doivent pas être classées en tant qu'énergies mais comme des vecteurs d'énergie, classe à laquelle appartient aussi l'hydrogène énergie (appelé ainsi pour le distinguer de l'hydrogène utilisé -ailleurs que dans les industries de l'énergie par exemple en pétrochimie- pour ses propriétés chimiques).

Remarque :

*On mesure les énergies primaires en Tep (tonnes équivalent pétrole) car l'énergie de référence est celle du pétrole. (1Tep = 41,855 Giga Joule = 11628 kWh)

*On mesure les énergies finales en kWh (kilowattheures) car c'est l'énergie électrique qui fait référence dans le domaine des applications.

Par contre si on ne sait pas stocker directement certaines formes d'énergie ou de vecteurs énergétiques, on peut appliquer des lois de la physique pour convertir de façons réversibles des formes non stockables d'énergie en des formes qui peuvent être stockées et réciproquement régénérées et déstockées.

Ce faisant, sans que les promoteurs de la loi sur l'énergie dite « loi POPE » du 15 Juin 2005 l'aient explicitement écrit dans le texte, le **stockage de l'énergie apparaît comme l'un des moyens** de satisfaire les objectifs de la loi à savoir **diminuer l'usage des énergies fossiles, lutter contre l'effet de serre** (participer à la division par 4 des émissions de CO₂ dans l'atmosphère d'ici 2050), **promouvoir l'usage des énergies renouvelables**.

C'est dans le cadre de cette loi que nous allons parler du stockage de l'énergie en général et plus spécialement de l'énergie électrique, énergie avec laquelle nous sommes le plus familiarisés du fait de la multitude de ses usages dans **l'industrie, l'habitat et le tertiaire**, et **les transports domaine dans lequel il faudra bien finir par se passer un jour du pétrole** malgré ses immenses avantages énergétiques et de facilité d'utilisation dans la pratique quotidienne sur tous ses concurrents potentiels **en corrigeant par la même occasion ses inconvénients majeurs** d'être

- à l'origine **d'émissions dispersées mais importantes de CO₂ en post combustion**
- et **sources de conflits géopolitiques pour son extraction, pour son acheminement, pour la dépendance dont font preuve les pays développés et en voie de développement.**

I-2 Généralités sur le stockage/déstockage de l'énergie

Les besoins et les technologies de stockage diffèrent évidemment suivant qu'ils sont centralisés et massifs (cas du stationnaire) ou décentralisés et de quantité modeste (cas de la mobilité).

Centralisés et massifs c'est le cas de la production de l'énergie électrique par des centrales hydrauliques associées à des barrages ou des lacs de retenu, c'est le cas du réseau électrique de transport d'énergie avec toutes les centrales connectées et en production (nucléaires, thermiques, hydrauliques) dont la gestion de l'énergie sur le réseau électrique se fait en temps réel en équilibrant la production sur la demande. On mesure les quantités d'énergie mises en œuvre en termes de MEGA ou de Giga Wattheures.

Décentralisés et de quantité modeste c'est le cas de tous les appareils portables (téléphones et P C consommant quelques Wattheures), portatifs (outillages variés de quelques centaines de Wattheures), mobiles (véhicules électriques de quelques dizaines de kilo Wattheures ; grosso modo 10 kWh d'énergie électrique permettent de parcourir 100 km).

On peut donc classer ces moyens de stockage en distinguant ceux qui sont raccordés au réseau de transport ou de distribution de l'énergie de ceux qui assurent l'autonomie de fonctionnement d'équipements mobiles auxquels ils fournissent l'énergie.

I-2.1/On peut ainsi classer ces moyens de stockage en fonction de leurs **finalités**:

En ce qui concerne la production et le transport d'énergie électrique sur le réseau.

**Garantir la production de l'énergie électrique au coût minimum 24 heures sur 24*

**Garantir la qualité du produit électricité à tout consommateur,*

**Minimiser les émissions de CO₂ dans la production d'énergie :*

En ce qui concerne les équipements autonomes (portables, portatifs, mobiles y compris en particulier le transport terrestre : véhicules électriques et véhicules à hydrogène du futur).

**D'abord assurer une autonomie acceptable (en durée d'utilisation ou en kilométrage parcouru -suivant les cas d'applications-) à des équipements non raccordés au réseau électrique et*

**Dans certains cas, en stockant et utilisant des carburants alternatifs aux carburants ou combustibles carbonés, éviter des émissions de CO₂ dans l'atmosphère :*

I-2.2/On peut aussi classer les différents équipements de stockage en fonction de leurs technologies, ou en fonction des durées de stockage ou de temps de réponse :

Barrages hydrauliques, stockages de liquides ou de gaz, stockages d'air comprimé, stockage d'électricité par batteries électrochimiques, par stockage capacitif, par stockage magnétique, stockage d'énergie mécanique par stockage inertiel, etc.)

Les durées de stockage dépendent de ces technologies ; elles peuvent s'exprimer en mois (barrages), en heures (stockage de gaz comprimés), en secondes (stockage capacitif) ou en dizaines voire en dixièmes de seconde (stockage inertiel).

C'est la démarche logique qu'il faut suivre pour faire l'étude exhaustive du stockage de l'énergie, établir la caractérisation des différentes technologies, et décrire les applications industrielles actuelles ou à venir.

I-3 Quelques rappels de physique élémentaire

Définitions

Nous devons distinguer la notion **d'énergie (kWh)** de la notion de **puissance (kW)** :

Un coureur de marathon fournit une certaine quantité d'énergie pendant la durée de la course qui dure plusieurs heures. Un haltérophile fournit de l'énergie pendant son effort lors d'un épaulé-jeté qui dure quelques secondes : il faudrait plutôt dire qu'il fournit de la puissance.

Dans la notion d'énergie rentre de façon implicite une notion de durée : la voiture électrique consomme 10 kWh pour parcourir 100 km. Par contre le démarreur de la voiture à moteur thermique fournit de la puissance (quelques kilowatts) pendant la ou les quelques secondes du démarrage pour vaincre les inerties des masses entraînées lors de la rotation du moteur et l'énergie électrique nécessaire à l'allumage, puis il s'arrête ; globalement ce démarreur a fourni très peu d'énergie, mais une puissance non négligeable : celle qui était nécessaire. Après ce démarrage, ce sont l'alternateur et la batterie électrochimique qui fournissent l'énergie électrique à tous les accessoires du véhicule consommant de l'électricité.

La puissance est le débit de l'énergie, en mathématique on dirait sa dérivée dans le temps.

Dans le domaine électrique on distingue la puissance par ses 2 composantes sur le quadrant puissance-temps qui sont **la puissance active** et **la puissance réactive**.

La puissance active c'est ce qui délivre l'effort, par exemple le couple instantané d'un moteur électrique et sa vitesse de rotation. La puissance réactive c'est ce qui s'accumule dans les entrefers, dans les inductances, dans les capacités, c'est ce qui est nécessaire pour créer les flux d'induction dans les transformateurs, les moteurs électriques, les alternateurs des centrales pour qu'ils puissent fonctionner à vide ou en charge. C'est aussi ce qui

est consommé en pures pertes lors de fuites de flux, de champs électromagnétiques liés aux passages de courant dans les lignes HT par exemple, lors de démarrages de moteurs asynchrones, (surtout s'ils ont un enroulement à la masse !) etc.

Prenons une image insolite : si vous commandez dans un café un demi de bière sous pression on vous emmène un verre rempli à ras bord, souvent légèrement débordant de liquide et de mousse. Quelques minutes à près, avant que vous buviez, il manque à peu près 2 cm de liquide dans le verre ! Ce qui manque, et que vous avez quand même payé, c'est la puissance réactive, c'est l'énergie du gaz qui a été utilisée pour faire passer la bière du tonneau dans le verre. Le reste, ce qui doit vous désaltérer et ce pourquoi vous étiez venu, c'est la puissance Active!

Energie et puissance active, on les retrouve dans toutes les applications mettant en jeu du stockage d'énergie électrique.

La puissance réactive on la retrouvera surtout dans les applications liées à un réseau alternatif mettant en œuvre de la production, de la distribution et de la consommation d'énergie électrique.

Ce que l'on stocke c'est toujours de l'énergie ; ce que l'on déstocke à chaque instant dans un système c'est de la puissance active et de la puissance réactive appelées par le comportement transitoire du système sous l'effet de sa charge et des perturbations (aléatoires ou non) qu'il rencontre et dont l'intégrale des 2 puissances sur la durée du déstockage représente l'énergie déstockée.

1-4 Stockage et déstockage

Ils sont basés essentiellement sur le principe de la conservation de l'énergie dans un système isolé, c'est-à-dire sur des transformations d'un type d'énergie finale en un autre type et plus précisément en ne retenant que le choix de transformations réversibles :

Energie mécanique en énergie électrique dans un ensemble turbine/alternateur entraîné par la détente d'un fluide et réciproquement si l'alternateur fonctionne en moteur

Energie électrique en énergie chimique et réciproquement dans le cas de batteries électrochimiques.

Energie électrostatique (stockages différentiels de charges électriques) en énergie électrique dans le cas de condensateurs ou de super condensateurs et réciproquement.

I-4.1 Procédés de stockage usuels d'énergie

*** Stockages de masse d'énergies supérieures à 100 MWh :**

Hydraulique gravitaire (centrales hydrauliques de pompages ou STEP)

Gaz comprimés (CAES)

Energie thermique nous n'en parlerons pas, concernera le chauffage dans l'habitat

*** Stockages de masse d'énergies inférieures à 1 MWh :**

Batteries électrochimiques

Bobines supraconductrices (SMES)

Stockages chimiques

*** Stockages de puissance**

Inertiel par machine accouplée à un volant

Condensateurs et super condensateurs

I-4.2 Facteurs de mérite

- *Réversibilité ou non, cyclabilité (nombre de cycles de charge+décharge tolérés), durée de vie
- *Processus physicochimique de charge/décharge
- *Fluide : nature/température/pression/réservoir
- *Quantité d'énergie stockée/durée de stockage en secondes/minutes/heures/jours/mois
- *Dynamique du stockage et du déstockage
- *Densité d'énergie et densité de puissance massique/volumique
- *Rendements unitaires et globaux pour un cycle de stockage+ déstockage
- *Position relative du stockage par rapport à la source et à l'utilisation
- *Usages (sur réseau électrique, usages autonomes par exemple véhicules électriques)

Pour une application donnée ces facteurs de mérite sont les critères de comparaisons entre solutions possibles dont le choix définitif dépend de facteurs technologiques, économiques, de pratiques courantes, d'acceptation sociétale de la solution retenue.

Exemple pour le véhicule automobile électrique :

Le choix des batteries dépend de nombreux facteurs :

- facteurs technologiques (densités admissibles d'énergie pour une autonomie kilométrique donnée et la masse et volume pris par les batteries dans le véhicule, cyclabilité (nombre de charges/ décharges possibles), durée d'immobilisation du véhicule pour recharger ou changer de batterie),
- facteurs de risques : dangerosité de la batterie en cas de choc ou d'accident,

Mais le choix du véhicule électrique en lui-même dépend de

- facteurs économiques : coût de la solution et en particulier prix des batteries, encouragements financiers divers
- du nombre et de l'accessibilité de stations de recharges rapides ou d'échange standard de batteries
- de l'acceptation sociale des utilisateurs face à d'autres solutions de mobilité possibles et concurrentes
- de normes d'antipollution (« interdiction d'émettre du CO₂ en ville »
- d'équipements des villes pour la libre circulation et le stationnement des véhicules électriques
- etc.

Pour naviguer dans le sillage de la main à la pâte, parlons des applications du stockage : pourquoi et comment stocker l'énergie ?

LES APPLICATIONS

II-1 APPLICATIONS CONCERNANT LE RESEAU ELECTRIQUE

II-1.1 *Fournir de l'énergie électrique à la demande*

II-1.1 a/ Les STEP ou Stations de Transferts d'Energie par Pompage

Ce sont des centrales hydrauliques gravitaires particulières car elles disposent d'un lac inférieur, d'un lac supérieur, et de conduites forcées pour faire transiter l'eau. Elles sont équipées de groupes turbines+ alternateurs réversibles. Elles peuvent fonctionner :

- soit en turbinage pour produire de l'électricité sur le réseau électrique
- soit en pompage en prélevant de l'énergie sur le réseau pour remonter de l'eau dans le lac supérieur.

La gestion de leur fonctionnement est simple :

Pendant les heures « creuses » -heures pendant lesquelles le coût de l'électricité est minimum les groupes hydrauliques remontent de l'eau dans le lac supérieur

Pendant les heures « de pointe » pendant lesquelles le coût de l'électricité est maximal (écart entre 5 et 10 pour certains pays) les groupes fabriquent de l'électricité par turbinage.

En valeurs moyennes pour restituer 1kWh d'énergie électrique sur le réseau avec de telles centrales il faut consommer 1,25 kWh en turbinage et 1,65 kWh en pompage/turbinage. La durée de stockage est quelconque mesurée en jours, mois, les débits de pompage sont de l'ordre de 50 m³/s et de l'ordre de 75m³/s en turbinage. Le rendement est légèrement supérieur à 70%.

Il existe une petite dizaine de STEP en France (Grand' Maison, Montezic,..., toutes en montagne, donc loin des grands centres de consommation d'énergie, pour une puissance de près 10 000 MW installés. Il en existe dans de nombreux endroits dans le monde.

Ce sont des centrales écologiques- dans les pays où l'électricité est exempte d'émissions de CO₂ comme en France-, au fonctionnement éprouvé, mais qui nécessitent des configurations géographiques particulières (coexistence de lac inférieur et supérieur élevé sur le site).

Utilisation des STEP

Les STEP sont actuellement utilisées de façons différentes par le gestionnaire du réseau en tant que réserves d'énergie pour :

- contribuer à produire l'énergie électrique au coût minimum.
- lisser la courbe de production journalière d'énergie (effacement des heures de pointe)
- gérer de façon saisonnière la consommation d'énergie hydraulique.
- participer au niveau tertiaire rapide d'intervention en cas de décrochage sur défaut du réseau de transport de l'énergie électrique.

A court terme :

-se substituer à toute centrale thermique pour réduire la production de CO₂ dans l'atmosphère.

-compenser en valeur moyenne l'intermittence des énergies éoliennes et solaires.

L'utilisation croissante de ce type d'énergies nécessitera la création de nouvelles STEP.

II-1.1b/ Les CAES : Stockage d'Énergie sous forme d'Air Comprimé

Cette forme de stockage non représentée en France concerne des centrales à gaz naturel dans lesquelles les turboalternateurs sont accouplés axialement à des turbocompresseurs, et près desquelles on a aménagé des cavités souterraines étanches (400 mètres environ) susceptibles de retenir de l'air comprimé sous 100 bars et dont le volume (400 000 m³) correspond à la quantité nécessaire pour assurer quelques heures de production d'électricité de la centrale (ordre de grandeur maximum 6 h). Le principe de fonctionnement est le suivant : dans une turbine à gaz les 2/3 de la consommation d'énergie se fait lors de la compression de l'air et 1/3 lors de la combustion du gaz. D'où l'idée de compresser de l'air aux heures creuses, de le stocker au voisinage et de le réutiliser aux heures de pointe pour la combustion du gaz. Pour restituer 1kWh d'électricité sur le réseau il faut consommer 0,75 kWh d'électricité et brûler 1,22kWh de gaz.

Des CAES de ce type fonctionnent en Allemagne (Huntorf près de Brême) et aux USA (Norton près de Cleveland) ;

Les CAES s'imposent dans les régions où l'installation de STEP est impossible.

Elles nécessitent la possibilité de pouvoir creuser des cavités souterraines profondes étanches. Leur avantage sur les STEP est de pouvoir être mises au voisinage de grands centres de consommation pour minimiser le transport d'énergie électrique ; leur **inconvenient** majeur est, comme pour toute centrale à gaz, **de rejeter du CO₂ dans l'atmosphère**.

Leur rôle : **lisser la courbe de production journalière entre heures creuses/heures pleines**.

Remarque :

1/Tout barrage en amont d'une centrale hydraulique est évidemment un stockage d'énergie

2/ Une centrale marémotrice basée sur les différences de niveau d'eau entre marées haute et basse peut être considérée comme une sorte de STEP.

3/ **Futur** : Pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables liées à la mer (éolien offshore, usines houlomotrices et hydroliennes, usines marémotrices) il est envisageable de les combiner sur site à des usines de pompage/turbinage d'eau de mer équivalentes aux STEP en zone côtière ou sur plateforme offshore construite dans ce but (appelées emerald lakes).

II-1-2 Améliorer la qualité du produit électricité distribué par le réseau

La qualité de l'onde électrique du réseau, au niveau de l'utilisateur, peut être dégradée au-delà des tolérances admises soit dans sa forme (présence d'harmoniques de tension et/ou de courants), en amplitude (niveau de tension), soit en fréquence de répétition (50 Hz).

Ces défauts sont d'origines diverses en cours du transport ou sur le lieu d'utilisation.

Certains modes de stockage d'énergie permettent de s'en prémunir.

Protection du réseau par compensation de puissance réactive

Pour éviter un échauffement exagéré des excitations des alternateurs des centrales et des chutes de tension en ligne trop importantes, le facteur de puissance du réseau F_p (plus vulgairement appelé $\cos \varphi$) doit être maintenu à une valeur constante en injectant ponctuellement sur le réseau de la puissance réactive stockée dans des condensateurs de puissance grâce à un jeu d'interrupteurs. Ces interrupteurs sont soit :

- des interrupteurs mécaniques pour une compensation à un niveau moyen constant ($F_p=0.85$)
- des interrupteurs statiques : semi conducteurs de puissance dont l'allumage est asservi à une valeur de référence pour réaliser une compensation dynamique de la puissance réactive.

Les organes de stockage sont donc des condensateurs de puissance.

Filtrage des harmoniques sur le réseau

Les réseaux de distributions sont souvent pollués par des harmoniques de courant ou de tension de rangs fixes (150, 300 Hz) multiples du 50 Hz ou par des harmoniques de rangs variables dus essentiellement à la commutation des composants de puissance de convertisseurs d'électronique branchés sur le réseau (correspondant à des alimentations de moteurs à vitesse variable ou d'alimentation de chauffage de fours électriques).

-Les harmoniques de rangs fixes peuvent être absorbés par des filtres passifs constitués de groupements d'inductances et de condensateurs dont la fréquence de résonance correspond à la fréquence à filtrer.

-Les harmoniques de rangs variables peuvent être détruits par des filtres actifs constitués d'inductances et de capacités raccordées sur le réseau au travers de convertisseurs d'électronique de puissance dont le contrôle détecte la présence d'harmonique et renvoie sur le réseau un courant (harmonique de courant) ou une tension (harmonique de tension) en opposition de phase et d'amplitude de chaque harmonique détecté.

Les organes de stockage sont des condensateurs et des inductances associés à des convertisseurs d'électronique de puissance.

Le filtrage actif se rencontre principalement sur des réseaux d'usines (métallurgie, cimenteries, etc.) ou en des lieux bien précis de pollution du réseau général.

II-1-3 Amélioration de la qualité du réseau par l'utilisateur

Alimentés par le réseau général, certains utilisateurs (laboratoires d'instrumentations, centres de calculs, certains services hospitaliers, etc.) ont néanmoins des besoins spécifiques de réseaux électriques internes de très grande qualité mais à des degrés divers.

De même certains ateliers industriels craignent des disparitions brutales et longues de réseau : ateliers d'électrolyse de l'aluminium, lignes de finitions en métallurgie, ateliers de peinture, etc. pénalisant la qualité ou la production.

Chaque cas est un cas d'espèce pour lequel il existe des solutions générales ou des solutions spécifiques toutes basées néanmoins sur des principes différents de stockages d'énergie.

Citons en quelques unes :

II-1-3-1 Nécessité d'un réseau sans coupure d'alimentation

Création d'un réseau secondaire isolé du réseau général à l'aval d'un **groupe électrogène**

-tournant par exemple diesel alternateur

-statique *onduleur autonome sur batterie ou UPS¹

***(Futur : pile à combustible)**

Avec toutes les variantes possibles : groupe électrogène en stand by ; groupe démarré à la demande ou à démarrage automatique ; groupe tournant avec ou sans volant d'inertie.

Dans le cas d'un groupe tournant ou d'une pile à combustible le stockage de l'énergie est la réserve de carburant

Dans le cas d'un onduleur c'est la batterie tampon située entre la partie redresseur et la partie onduleur de l'UPS qui stocke l'énergie sous forme électrochimique.

Cette batterie, la réserve de carburant du groupe électrogène, doivent être dimensionnées pour fournir suffisamment d'énergie pendant la durée de la coupure maximale définie à l'avance.

¹ UPS Un-interruptible Power Systems

II-1-3-2 *Nécessité d'un réseau sans microcoupures*

Solution générale : utilisation d'UPS alimentant les équipements sensibles susceptibles d'être perturbés par les microcoupures (en général : équipements électroniques de faibles puissances tels que calculateurs, régulateurs, appareils d'instrumentations, appareillages de sécurité, etc.).

II-1-3-3 *Solutions spécifiques industrielles*

L'industrie est en général moyennement concernée par des coupures brèves d'alimentation électrique car elle a cherché à s'en prémunir a priori lors de l'étude de ses réseaux d'usine. Les solutions adoptées sont en général spécifiques au type d'industrie et d'équipements, par exemple distribution de l'énergie électrique sous forme continue et non alternative par des bus entre équipements de moteurs à vitesse variable, récupération d'énergie cinétique en baissant la vitesse de machines, etc. Nous nous bornons à évoquer le problème pour être complet.

II-2 *GESTION DU RESEAU ELECTRIQUE EN CAS D'INCIDENT*

Le réseau électrique mutualise l'ensemble des moyens de production pour fournir en énergie électrique sans interruption et au coût minimum tous les consommateurs abonnés et raccordés.

Le gestionnaire du réseau doit équilibrer en temps réel la production à la demande.

Il arrive qu'un excès de demande ou un incident sur le réseau (panne, accident, disparition brutale d'une source d'énergie –éolienne par exemple-) conduise à une coupure de courant ou à un décrochage de centrales.

Le gestionnaire du réseau dispose de **3 niveaux progressifs d'intervention** pour remédier aux incidents suivant leur degré de gravité.

Niveau 1 ou niveau primaire : la régulation des groupes synchrones connectés sur le réseau, les inerties mécaniques de leurs lignes d'arbre, la puissance synchronisante échangée entre eux réagissent -sans intervention humaine- pour satisfaire à la nouvelle demande en moins de 10 secondes.

Niveau 2 ou niveau secondaire : réaction automatique de rééquilibrage des échanges par zones et différents pays (durée de 1 à 10 minutes environ)

Niveau 3 ou niveau tertiaire : Le gestionnaire reconstitue les réserves d'énergie pour se ramener aux 2 niveaux précédents en connectant de nouvelles centrales (au-delà de 10 minutes) ;

Il y a en fait 2 sous niveaux dans ce niveau tertiaire :

- le niveau tertiaire rapide constitué par les usines à démarrage immédiat : hydroélectriques de hautes chutes, les STEP, les centrales à gaz

- le niveau tertiaire différé constitué par les autres centrales plus lentes dont les nucléaires.

Comme dans tout système physique soumis à perturbations ce sont les énergies stockées qui permettent de retrouver la stabilité.

III APPLICATIONS AUTONOMES

III-1 2 grandes familles d'applications :

*Les alimentations électriques des appareils portables et portatifs

*La génération de l'énergie de propulsion des véhicules du futur :

Véhicules hybrides, véhicules électriques, véhicules à hydrogène

Les éléments clefs du stockage sont les batteries électrochimiques (pour l'énergie) et les super condensateurs (pour les échanges de puissance).

Nous ne parlerons pas des alimentations des appareils portables et portatifs qui disposent déjà de solutions tout à fait acceptables (mais améliorables en durée de vie et en légèreté).

Elles utilisent parfois des piles (par définition non rechargeables), essentiellement des batteries (actuellement batteries de type lithium-ions), au futur elles disposeront de micro-piles à combustibles plus puissantes avec réserve de combustible rechargeable (pour en accroître le nombre de fonctionnalités potentielles en particulier dans le domaine militaire).

Dés lors nous ne nous intéresserons ici qu'à la seconde famille d'applications qui est actuellement en recherche de solutions technico économiques intéressantes.

Ces solutions sont fondamentales pour le transport terrestre, en particulier pour le futur de l'automobile à émission faible ou nulle de GES (Gaz à Effet de Serre) et de particules.

III-2 La génération et le stockage de l'énergie pour les véhicules du futur

3 types de véhicules de technologies différentes sont envisagés pour le futur, susceptibles de se réduire ultérieurement à 2. Ils font appel à 3 modes de stockage d'énergie embarquée différents pour assurer l'autonomie kilométrique du véhicule:

***Le véhicule électrique** (dont l'énergie est fournie au moteur électrique de propulsion par une batterie électrochimique rechargeable sur le réseau) à l'horizon 2015.

-Le stockage d'énergie est assuré par la batterie électrochimique

***La famille des véhicules hybrides** thermiques/électriques à court terme 2010, d'abord à 2 propulsions séparées thermique et électrique, puis ultérieurement de type « range extender » avec groupe électrogène pour fournir l'énergie à une propulsion électrique unique vers 2020. On pourra la voir aussi comme une sorte d'extension du véhicule électrique.

-2 stockages : le réservoir du moteur thermique et une batterie électrochimique.

***Le véhicule à pile à combustible à hydrogène** (peu probable avant 2050 –dans les faits quand on saura créer une production de masse d'hydrogène sans émission de CO₂ et économiquement acceptable-). C'est un véhicule à propulsion électrique, dont l'énergie électrique est générée par une pile à combustible à hydrogène. (Aussi de type range extender).

-L'énergie stockée est la réserve d'hydrogène embarquée dans le réservoir de bord

A titre de référence : le véhicule thermique actuel

A ce point du discours il est bon de rappeler que le véhicule actuel est un véhicule à moteur thermique à essence ou à gazole. Il représente un compromis optimum sur le plan du stockage de l'énergie embarquée. Il s'agit de carburant liquide, manipulé à température ambiante et sous pression atmosphérique, utilisable sans précautions particulières partout dans le monde dans une large gamme de température (-20 à +40° C) et tel qu'il est possible de faire le plein du réservoir en moins de 5 minutes. Prenons en référence un véhicule Peugeot 107 Sur un trajet de 100 km parcouru à 100 km/heure en moyenne à charge normale, l'énergie nécessaire pour vaincre la résistance de l'air est de 7kWh, celle nécessaire pour vaincre les

frottements de roulement est de 3kWh, la climatisation représente une consommation de 1 à 2 kWh. La consommation globale d'énergie sur les 100km parcourus est de l'ordre de 10kWh.

Par commodité nous avons extrait du rapport de J. SYROTA du 28/00/2009 :
« Perspectives concernant le VEHICULE « grand public » d'ici 2030 » à la page 48 les 2 tableaux comparatifs suivants :

	essence	diesel	électricité	GNV	GPL	H2 gazeux	H2 liquide
Etat	liquide	liquide	Electro chimique	gaz	liquide	gaz	liquide
Temp. °C	Ambiante	Ambiante	Ambiante à 300° * 3	Ambiante	Ambiante	Ambiante	-253° Celsius
Pression stockage	Ambiante	Ambiante	Ambiante	>200 bars	5 à 25 bars	700 bars	5 bars
Energie massique Wh/kg	11900	11800	30 à 200	2200	7080	1200	500 à 1000
Energie volumique Wh/litre	8900	9900	70 à 300	2500	4300	450	1800
Durée remplissage	5 mn	5 mn	4 à 6 h 25 à 40 mn *2	5 mn	5mn	5mn	5mn
Rendement à bord du réservoir à la roue	30 à 35%	40 à 42%	80 à 85%	20 à 38%	30 à 35%	45%	30 à 35%

Il suffit de comparer les énergies massiques et volumiques stockées, et par voie de conséquence les autonomies kilométriques qui en découlent, pour se convaincre de l'avantage dont disposent les produits pétroliers sur les carburants du futur - électricité et hydrogène- pour la réalisation de véhicules légers, à grande habitabilité.

On est tout de suite frappé par la faiblesse des énergies massiques et volumiques des batteries et par les conditions de stockage de l'hydrogène qui doit être comprimé à bord à 700 bars s'il est gazeux ou à -253°C s'il est liquide (d'où poids et dépenses d'énergie supplémentaires !).

Le rendement indiqué dans la dernière ligne ne concerne que le véhicule ; il ne tient pas compte du rendement des opérations amont pour obtenir le carburant, rendement qui dans certains cas peut être faible (cas de l'hydrogène fabriqué par électrolyse de courant fourni par une centrale thermique ou nucléaire par exemple qui inclut nécessairement le rendement d'un cycle de Carnot au niveau des turbines des centrales électriques).

Ce qui est fondamental c'est le rendement global : énergie au niveau de la roue par rapport à l'énergie primaire (*from well to wheel*) qu'il a fallu dépenser.

*2 temps ramené à 10 mn si changement de batteries organisé en station service

Le second tableau compare les performances qu'aurait un véhicule type 107 (actuellement pourvu d'un réservoir essence ou gazole de 60 litres) dans ses différentes versions

	Essence	Diesel	Electricité	GNV	GPL	H2 gaz	H2 liq.
Poids du réservoir à vide kg	45	50	90 à 150	70	36	90 à 100	100 à 200
Durée de recharge	5 mn	5 mn	6 h	5 mn	5 mn	5 mn	5 mn
Autonomie Résultante en km	~900	~1000	30 à 120 Suivant type De batterie	160	430	200 à 300	~180

Toutes choses égales par ailleurs on ne peut que constater les faibles performances des véhicules électriques ou à hydrogène en ce qui concerne les autonomies et le poids des réservoirs : c'est le prix à payer pour éviter les émissions de GES (CO₂, NO_x) et de particules dans l'atmosphère.

On voit tout de suite les 2 points faibles majeurs qui pénalisent la pénétration des véhicules électriques sur le marché : les faibles performances des batteries et la trop longue durée de la recharge de la batterie à partir du réseau.

III-3 LES BATTERIES ELECTROCHIMIQUES

Elles font l'objet de nombreuses recherches pour améliorer les **4 paramètres essentiels** : L'énergie massique en Wh/kg, l'énergie volumique en Wh/litres, la puissance massique en W/kg, la cyclabilité c'est-à-dire le nombre de cycles de [charge+décharge] que la batterie peut supporter (c'est aussi sa **durée de vie**).

On dispose de 3 technologies principales : **Plomb-acide** **PbAc**
Nickel métal hydrures **NiMH**
Lithium -lithium-ion **LiIon**
-lithium metal polymère **LiPo**

La technologie Nickel-Cadmium pourrait être retirée du marché pour cause de dangerosité. Seules la vieille technologie PbAc et la plus récente NiMH sont sur le marché ;

Les technologies au lithium pour l'industrie de l'automobile sont les plus performantes et les plus intéressantes, elles sont en cours d'industrialisation. Il n'y a pas en 2009 de véhicule électrique commercialisé utilisant des batteries au lithium

TABEAU DE COMPARAISON DES PERFORMANCES DES BATTERIES

Technologies	Energie Wh/kg	Energie Wh/litres	Puissance W/kg	Nombre de cycles	Rendement %	Plage de températures C°
Pbac	40-50	100	140-250	800-1500	70-85	20 à 40
NiCd	40-50	130	120-350	800-1500	70-75	-40 à 50
NiMH	60-80	200-350	200-600	500-2000	70-80	0 à 45
LiIon	110-220	150-450	200-600	800-1500	85-90	-20 à 60
LiPo	100-180	100	300-500	300-1000	90-95	- 20 à 60
Superconden.	12-20	3-6	2000-10000	500k-1M	95-100	-20 à 90

Dans la **technologie lithium ions**, anodes et cathodes sont conçues en **matériaux nano structurés** pour faciliter la pénétration des ions lithium ; l'**anode est en graphite lithié** ; la **cathode est faite d'oxydes de lithium + oxydes de cobalt ou de fer-phosphate, ou de nickel, ou de titane** ; l'**électrolyte solide est enrichi en lithium ions**.

Il n'y a pas d'effet mémoire, l'auto décharge est très faible, aucun besoin d'entretien.

C'est une technologie **en cours d'évolutions** sur au moins 3 axes : **les matériaux d'électrodes, les technologies d'électrolytes et de connectique, la gestion interne de l'énergie et de la température**. Le CEA espère arriver à des énergies massiques de 300 Wh/kg vers 2015 en utilisant du phosphate de fer à la cathode (On diviserait alors par 2 la masse des batteries actuelles).

Les accumulateurs au lithium ne sont pas liés à un couple électrochimique, tout matériau susceptible d'accueillir des ions lithium peut être à la base d'un accumulateur d'où la profusion de variantes, reste à trouver la variante optimale.

Une variante au **lithium ion** est le **lithium métal polymère** utilisant un électrolyte polymère sous forme de gel.

Cette technologie est voisine de celle utilisée pour la fabrication des super condensateurs.

Les super condensateurs ont des capacités de plusieurs dizaines de milliers de farads, une cyclabilité très importante et des temps de réponse de l'ordre de la seconde.

Ils ont un double comportement naturel de batterie et de condensateur conventionnel. Ils sont tout désignés pour échanger de façon bi directionnelle de la puissance (par exemple dans les automobiles pour récupérer l'énergie de freinage, fournir et récupérer de l'énergie lors des manœuvres de « *Stop and Start* »). Ils peuvent être utilisés comme réserve dynamique d'énergie électrique entre pile à combustible et motorisation des roues pour la propulsion électrique des véhicules à piles à combustible à l'hydrogène.

D'où l'idée d'intégrer dans les batteries au lithium une fonctionnalité de super condensateur afin d'obtenir 2 avantages : donner à la batterie une fonction d'échange rapide d'énergie et éviter l'usage d'un convertisseur d'électronique de puissance entre batterie et super condensateur qui est actuellement nécessaire.

Remarque *³

1/ On voit évidemment l'importance qu'a le stockage de l'énergie pour le développement futur de l'automobile électrique. Le nécessaire accroissement des performances des batteries n'est évidemment pas le seul problème à résoudre pour la mise sur le marché de ce type de véhicule à prix attractif, nous en avons très brièvement évoqué le contexte au § I-4.2

2/ Si la voiture électrique venait à se développer il serait nécessaire de rajouter quelques tranches de centrales nucléaires sur le réseau, de revoir la distribution de l'énergie électrique dans les villes, les garages, les stations services, les maisons (augmentation de puissance des arrivées de courant et des sécurités)

3/ Par contre le déséquilibre de production de l'énergie électrique entre heures de pointe et heures creuses pourrait être réduit de façon significative et économiquement intéressante.

*3 Nous avons exclu pour le véhicule automobile l'usage de la batterie Zebra (**sodium-chlorure de nickel**) fort intéressante par ailleurs : à électrolyte céramique solide, d'énergie spécifique de 120 Wh/kg et de puissance spécifique de 180 W/kg car elle fonctionne à trop haute température entre 270 et 350°C pour les voitures particulières mais elle est utilisable pour les poids lourds ;

III-4 Le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules

La plupart des experts pensent que, s'il y a un jour des véhicules à hydrogène, il s'agira de véhicules à piles à combustible et non de véhicules thermiques. Néanmoins la problématique du stockage serait pratiquement la même si l'hydrogène était utilisé en combustion.

On sait aussi que dans la classe des véhicules de type 107 Peugeot la consommation en hydrogène sera de l'ordre de 10 grammes d'hydrogène/ km (1 kilo de H₂ pour 100 km).

C'est une masse négligeable, il n'en est pas de même de celle du réservoir correspondant !

De façon générale on stocke de 2 à 7% de masse d'hydrogène par rapport à la masse du réservoir d'où des autonomies visées relativement faibles pour réduire les consommations.

Les difficultés restant à surmonter concernant le stockage embarqué de H₂ sont multiples :

Quelles technologies utiliser, quelle masse et quel volume pour le réservoir et ses auxiliaires, quels matériaux, quelles sécurités en résulteront pour les personnes et les biens ?

On sait que l'hydrogène est le plus léger, le plus volatil des corps, un des plus inflammables et explosifs, le plus agressif (donc se combine à tous les métaux sous forme d'hydrures dont on ne peut l'extraire qu'en dépensant beaucoup d'énergie –pour le produire ou pour l'utiliser-).

3 technologies sont possibles, elles font l'objet de nombreuses études technologiques et économiques et de réalisation de prototypes, **mais aucune n'est industrialisée à ce jour car aucune n'est satisfaisante**. Les 3 modes de stockage concernent l'hydrogène **liquide à -253°C**, l'hydrogène **gazeux sous pression**, le stockage sous forme **solide d'un hydrure ou d'une solution hydrogénée** dont il faudra l'extraire (c'est la solution qui semble actuellement la plus prometteuse).

III-4.1 Stockage sous forme d'hydrogène liquide

L'hydrogène liquide cryogénique à -253 °C, sous une pression de quelques bars a une densité élevée (60 gr/ litre), il est utilisé couramment dans l'industrie. Embarqué, il présente

3 défauts graves:

Il nécessite une isolation thermique lourde et importante du réservoir pour son maintien en température.

L'énergie nécessaire à sa liquéfaction (et donc perdue pour la propulsion du véhicule) représente 30 à 40% de l'énergie contenue dans l'hydrogène.

Il s'évapore (phénomène de boil off) à raison de 3% par jour ce qui est gênant et particulièrement dangereux dans des garages étanches.

III-4.2 Stockage sous forme d'hydrogène gazeux sous pression

C'est en apparence la plus simple des solutions de stockage, mais pour avoir une énergie massique suffisante il faut comprimer fortement l'hydrogène. On a normalisé 700 bars.

C'est une pression trop élevée pour pouvoir être mise n'importe où et entre les mains de n'importe qui.

Le réservoir, soumis à des contraintes de fatigue du fait des variations de pression entre vides et pleins est constitué d'une enveloppe composite en fibres de carbone et d'un liner d'étanchéité souple en aluminium.

III-4.3 Stockage sous forme solide

C'est la solution aujourd'hui la plus prometteuse, elle permettrait en plus d'atteindre un rapport de masse d'hydrogène de 7% par rapport à la masse du réservoir. Plusieurs pistes sont étudiées : hydrures métalliques, décomposition catalytique de produits hydrogénés, stockage capillaire autour de nanotubes de carbone, de microbilles de verre, etc.

Le point faible est le dispositif d'extraction de l'hydrogène qui exige un supplément de volume, de masse et une certaine consommation d'énergie à bord du véhicule.

IV Conclusion générale

Stocker de l'énergie, l'utiliser à bon escient, est incontestablement l'un des moyen de lutter contre l'émission de GES et de favoriser l'utilisation des énergies renouvelables au détriment des énergies carbonées (pétrole, charbon, gaz). Néanmoins dans le domaine des transports, principalement le transport terrestre le plus pollueur, les solutions de stockage actuelles ne sont pas satisfaisantes sur le plan technico économique pour que l'on puisse se passer de carburants carbonés ; beaucoup de recherches très orientées doivent être faites pour atteindre les objectifs fixés par la loi POPE de 2005.