

Introduction au stockage de l'énergie électrique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Hélène HORSIN MOLINARO - Bernard MULTON

Edité le
08/04/2019

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

Bernard Multon est Professeur des Universités au département de Mécatronique de l'ENS Rennes [1] et chercheur dans le groupe SETE du pôle CSEE du laboratoire SATIE [2].

Cette ressource pédagogique est principalement basée sur le module d'enseignement dispensé par Bernard Multon au département Mécatronique de l'ENS Rennes « Energétique électrique » [3] dispensé en 2017-2018 en Master 2 Ingénierie des Systèmes Complexes parcours Enseignement.

« *L'électricité ne se stocke pas* » est une affirmation fréquente, tant de la part d'enseignants que de celle de politiques, mais elle est fautive [4]. L'énergie électrique se stocke bel et bien, rarement directement, souvent indirectement mais sans (ou quasiment sans) limite théorique de rendement énergétique. Elle se convertit alors en formes intermédiaires parfaitement stockables (potentielle gravitaire, cinétique, chimique...). Les excellents rendements de conversion dans les deux sens de transformation, aussi bien lors de la charge que de la décharge, permettent de la restituer, dans la plupart des cas sans limite thermodynamique. En effet si les transformations ne sont pas trop rapides ni excessivement lentes, les pertes énergétiques peuvent être suffisamment faibles pour considérer un stockage à haut niveau de réversibilité, le rendement, in fine, résulte juste d'un dimensionnement optimisé pour répondre à une question technico-économique.

La part de l'électricité, dans le mix mondial d'énergie finale, progresse à un rythme rapide qui devrait se poursuivre dans les années à venir [5]. L'électricité apparaît, en outre, comme un vecteur fondamental de développement, porteuse d'un fort potentiel pour un développement humain soutenable. En effet, elle permet la conversion [6] de toutes les ressources primaires, et tout particulièrement les renouvelables, elle permet également l'accès à tous les services, en premier lieu les plus indispensables. Dans un contexte de nécessaire baisse des émissions de gaz à effet de serre, d'accroissement de l'indépendance énergétique, de diminution de consommation de ressources fossiles (...), il s'agit d'augmenter la pénétration des sources variables et incertaines issues des ressources primaires renouvelables, de très loin les plus abondantes (rayonnement solaire et vent) et de réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint (idéalement alimentées avec des combustibles renouvelables) lors des périodes d'insuffisance de production relativement à la demande. Le stockage de l'énergie électrique doit ainsi permettre d'accroître significativement le taux de pénétration des moyens de production renouvelable variable (photovoltaïque et éolien) dans les réseaux électriques, ceci dans un contexte de marchés de l'énergie ouverts et donc concurrentiels. Il autorise également l'îlotage de consommateurs/producteurs en situation de dysfonctionnement du réseau. Le but étant d'obtenir une alimentation en électricité plus sûre et plus robuste et, in fine, un système électrique plus résilient que le présent.

Cette ressource pédagogique expose les caractéristiques des systèmes de stockage électrique de façon unifiée afin de pouvoir comparer et évaluer des technologies très différentes quelles que soient les formes d'énergie intermédiaire exploitées (potentielle, cinétique, électromagnétique, électrochimique...). La description des systèmes de stockage fait l'objet de la ressource pédagogique « *Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique* » [7].

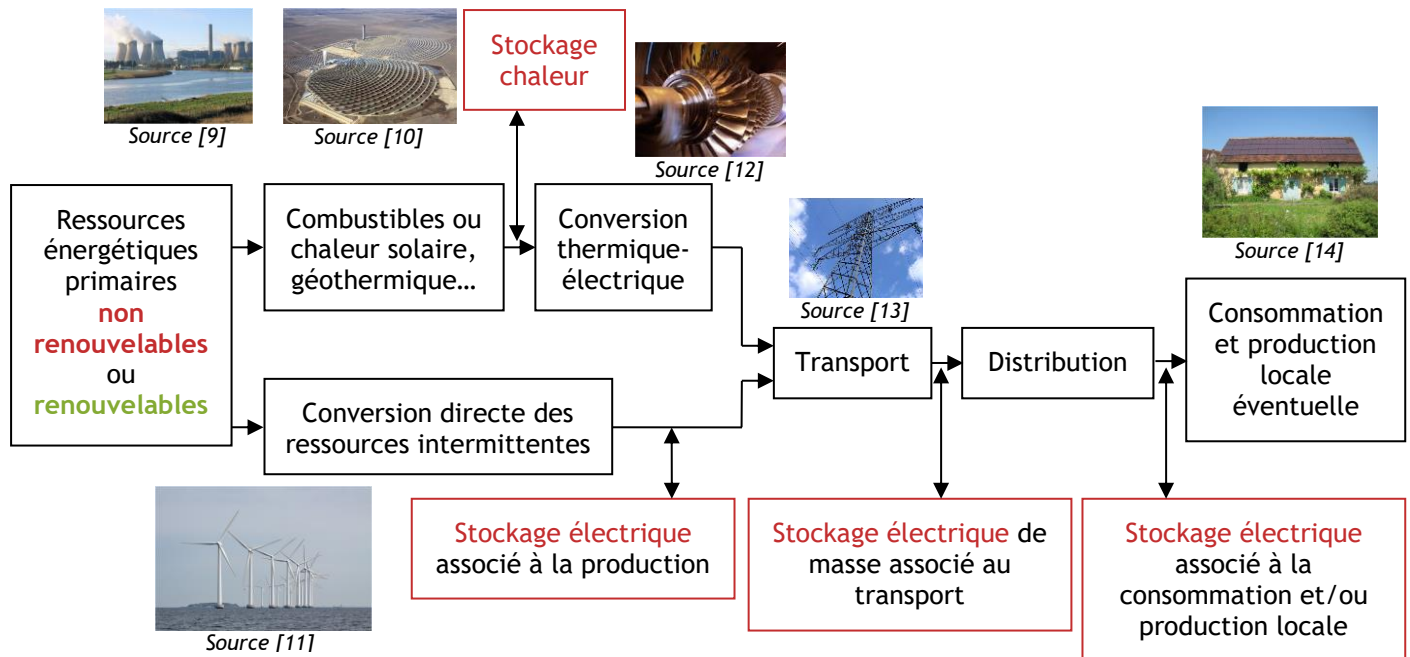


Figure 1 : Synoptique du potentiel d'applications du stockage dans le système de production - transport - distribution électrique, source [8]

1 – Contexte

Les contextes électriques et les besoins sont divers. Si nous sommes déjà familiarisés avec le stockage d'électricité dans l'électronique portable (téléphone, ordinateur...) ou l'outillage portable, les valeurs de capacité embarquée sont faibles et le coût, pourtant relativement élevé, est parfaitement accepté eu égard au service rendu. En effet, si l'on considère une durée de vie de l'ordre de 1 000 cycles de charge/décharge, le coût du kWh est environ 10 fois plus élevé que celui délivré par les réseaux.

Dans le contexte de mobilité, des systèmes de stockage électrochimique de l'ordre du kWh ou de la dizaine de kWh sont d'usage courant pour les petits véhicules électriques (engins de manutention, fauteuils roulants...). Dans le cas de véhicules électriques (voiture, camion, bus,...), les cycles sont plus irréguliers : décharges dépendant des trajets parcourus, et charges limitées en puissance par la source et par le dimensionnement du chargeur ou celui de la batterie dans le cas de recharge rapide. Dans les véhicules hybrides, le système de stockage a un rôle différent, il intervient directement dans l'optimisation de l'énergie dépensée, en permettant au moteur à combustion interne de fonctionner à plus haut rendement, réduisant ainsi la consommation de carburant [15]. La mobilité terrestre électrique peut aussi être assurée par des moyens guidés et alimentés en continu (métro, tramway, train,...) en dehors de quelques possibles interruptions nécessitant une courte autonomie. Ces moyens de transport consomment la puissance électrique par pics très supérieurs à la puissance moyenne lors des accélérations et des freinages (pics négatifs). Les réseaux d'alimentation par caténaire peuvent être réversibles pour récupérer l'énergie lors des phases de freinage mais seulement grâce au transfert vers des véhicules consommant de l'électricité au même instant, car les sous-stations, connectées au réseau électrique national, ne sont généralement pas réversibles (en effet, il n'y a pas d'intérêt financier à récupérer une énergie qui n'est pas rachetée par le fournisseur, ce que la réglementation pourrait cependant changer). Un système de stockage embarqué permettrait d'absorber une puissance lissée, sur une ligne dimensionnée au plus proche de la valeur moyenne, et contribuerait à réduire les pertes du système d'approvisionnement en énergie.

Les contraintes de masse, très importantes dans les applications mobiles et embarquées, sont nettement moins critiques lorsqu'il s'agit d'applications stationnaires. Le stockage est déjà largement employé dans les alimentations ininterrompibles (systèmes de secours, appelés parfois « onduleurs »). Leur gamme de puissance est comprise entre la centaine de W à plusieurs dizaines de MW. On trouve également des systèmes de stockages stationnaires pour améliorer la disponibilité électrique de sites isolés autonomes alimentés en énergie photovoltaïque (ou plus rarement éolienne). Dans le cas des grands réseaux, le stockage par centrales de pompage-turbinage (STEP¹) est déjà largement répandu pour leur régulation et représente, aujourd'hui encore, la plus grande capacité cumulée de stockage. Les réseaux électriques, dits intelligents (smart grids), sont constitués par l'ensemble des systèmes de production, stockage, transport, distribution et consommation d'électricité (figure 1) plus communicants entre eux et gérés avec plus d'intelligence que dans les cas des réseaux traditionnels (ces derniers nécessitaient déjà une planification et un contrôle en temps réel loin d'être stupides !). C'est sans doute la présence d'une électronique de puissance permettant de convertir des puissances de plus en plus grandes, de façon fiable avec un bon rendement, qui autorise désormais un contrôle plus fin des sources et des charges et la pleine mise en œuvre de cette intelligence. Alors que l'on a répété très longtemps que l'électricité ne se stockait pas, il s'avère que, non seulement elle est stockable, avec de bons rendements, mais le stockage devient plus inévitable que jamais, même s'il est généralement nécessaire de passer par des formes intermédiaires d'énergie [4].

2 – Localisation du stockage au sein du système électrique

Le stockage de l'énergie électrique peut trouver sa place tout au long de la chaîne depuis la production jusqu'au lieu de consommation (figure 1).

2.1 - Au niveau des générateurs (sources)

Si la présence quasi-systématique d'une interface électronique de puissance entre les sources modernes (éoliennes ou photovoltaïques) permet le réglage de la puissance réactive, utile notamment pour la participation au réglage de la tension, les degrés de liberté concernant le réglage de la puissance active (associé au réglage de la fréquence) est beaucoup plus contraint vu que la production est associée aux conditions météorologiques. Or, on attend que ces nouvelles sources, amenées à occuper une place très significative dans les réseaux, participent aux « services systèmes », c'est-à-dire au contrôle des puissances active et réactive. La présence d'un système de stockage à ce niveau de la chaîne énergétique permettrait ainsi une meilleure intégration dans les marchés ouverts de l'énergie en participant au réglage de la fréquence grâce à la possibilité d'ajuster, à la baisse ou à la hausse, la puissance active. Des applications pilotes (photovoltaïque et éolien) ont été testées en France (surtout dans les zones insulaires) et dans bon nombre de pays.

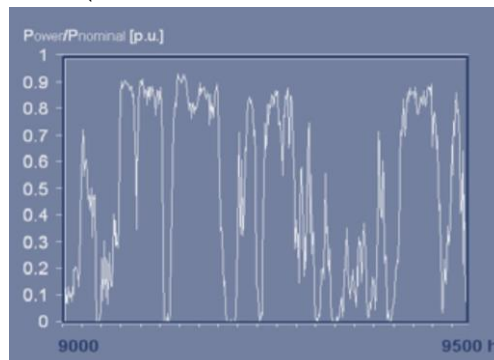


Figure 2 : Exemple de profil temporel de production d'une ferme éolienne, source Kariniotakis, CENERG

¹ Station de Transfert d'Énergie par Pompage

2.2 - Au niveau du réseau de transport

Au niveau du réseau de transport (généralement en haute tension HTB), des systèmes de stockage peuvent jouer un rôle important pour ajuster l'équilibre production/consommation. Si les stations de pompage-turbinage ou STEP (la technologie de stockage d'énergie électrique la plus utilisée au monde et de très loin) permettaient à l'acteur unique (avant l'ouverture aux marchés) de bénéficier d'un degré de flexibilité supplémentaire pour la gestion du réseau, dans le système actuel, les STEP sont hélas plus considérées comme des outils de production flexible que comme des moyens de stockage. En France, la construction des STEP a été largement motivée par le développement du parc nucléaire très peu flexible et insuffisant pour maintenir l'équilibre (voir les fluctuations de la puissance totale appelée en France au sein d'une même journée en hiver et en été, figure 3). Notons enfin que, dans l'état actuel des connaissances, un ajustement saisonnier par stockage d'énergie réversible n'est absolument pas envisageable. Quant aux moyens non réversibles existants de stockage, ils exploitent l'énergie potentielle de l'eau stockée dans des barrages ainsi que des combustibles (généralement non renouvelables fossiles et fissiles) des centrales thermiques.

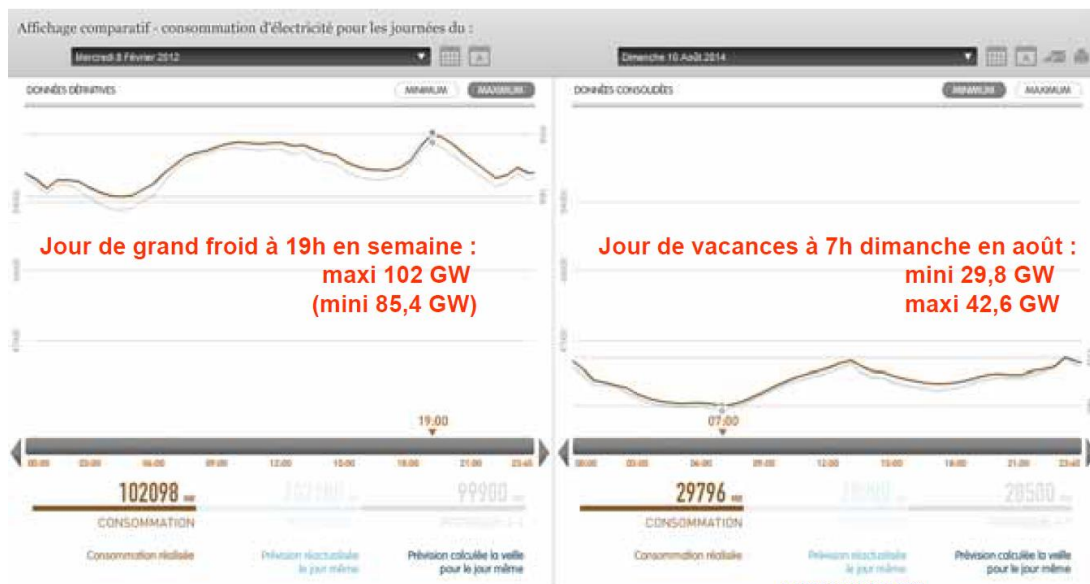


Figure 3 : Exemples de deux journées en France : en semaine à 19 heures par un froid mois de février, et un dimanche en août à 7 heures du matin, source [16]

En 2013, la capacité de stockage mondiale installée, exprimée en puissance maximale, valait environ de 170 GW sur un total de 5 300 GW de capacités de production. Sur la même période, en France, ces chiffres étaient respectivement de 6,3 GW (en réalité seulement 5 GW opérationnels) et 120 GW.

2.3 - Au niveau des consommateurs

Placé au bout de la chaîne, le stockage permet une sûreté d'approvisionnement, mais également les possibilités d'un lissage ou d'un écrêtage de consommation et donc un meilleur dimensionnement du réseau de distribution. En outre, la possibilité d'îlotage de longue durée devient possible si une production locale existe (PV par exemple). Des telles applications se rencontrent déjà dans un rôle de secours (batteries électrochimiques, volants d'inertie, souvent en assistance de groupes électrogènes). Typiquement, dans le secteur résidentiel, le rapport entre la puissance maximale et la puissance moyenne est de l'ordre de 10 (voir exemple de la figure 4).

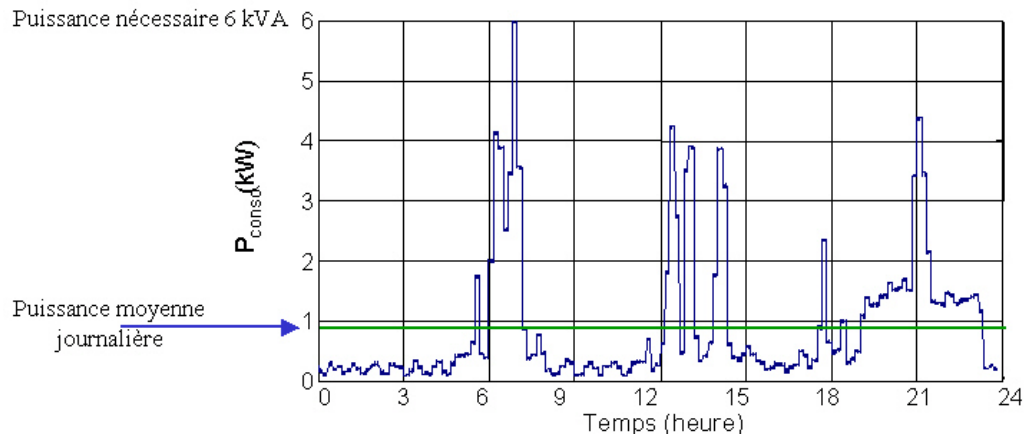


Figure 4 : Exemple de profil de consommation résidentiel sur une journée, source O. Sidler [17]

3 – Vision unifiée des caractéristiques des systèmes de stockage

La grande variété des principes et technologies des systèmes de stockage, nécessite d'unifier la définition de leurs principales caractéristiques, afin notamment de mieux les comparer, de mieux évaluer les différentes solutions et d'optimiser leur dimensionnement sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes dans lesquels ils doivent être intégrés. C'est en effet la condition nécessaire pour qu'ils apportent le meilleur bénéfice tant sur les plans économiques qu'environnementaux.

3.1 - Le Système de Stockage d'Énergie Électrique (SSEE)²

Un accumulateur d'énergie électrique, exploitable au sein d'un système énergétique plus global, constitue déjà à lui seul un système relativement complexe, lié notamment aux conversions vers une forme d'énergie intermédiaire. Les principales fonctions présentes dans un système de stockage d'énergie électrique générique sont mises en évidence figure 5, en particulier le bloc « forme intermédiaire d'énergie » représente le « réservoir », c'est-à-dire la partie stockant « physiquement » l'énergie. C'est le module dont le dimensionnement est directement dicté par la capacité énergétique.

Les formes d'énergie intermédiaires sont très variées. Il peut s'agir d'énergie potentielle associée à la gravité terrestre, d'énergie cinétique d'un système en rotation, de la pression des fluides compressibles, d'énergie des liaisons covalentes de certaines molécules (électrochimie) ou encore de formes électromagnétiques de l'énergie (condensateurs, et inductances supraconductrices).

Doit-on privilégier un stockage direct ou indirect ? En définitive, cela a peu d'importance car, quel que soit le moyen de stockage, il est nécessaire d'utiliser un ou plusieurs convertisseurs d'adaptation comme le montre la figure 5, ne serait-ce que pour adapter électriquement le système de stockage à la source électrique à laquelle on l'associe. Un convertisseur électronique de puissance permet d'assurer cette adaptation purement électrique, mais également le contrôle du flux d'énergie (puissance) en charge et décharge.

Dans les systèmes de stockage les plus évolués, on ajoute des fonctions de contrôle et de diagnostic, notamment pour connaître leur état de charge mais également pour évaluer leur état de santé ou d'usure. Car, si l'énergie électrique se stocke effectivement, les systèmes de stockage sont toujours relativement coûteux et il est fondamental de les exploiter le plus efficacement possible afin de minimiser leur vieillissement.

² En anglais ESS : Energy Storage System

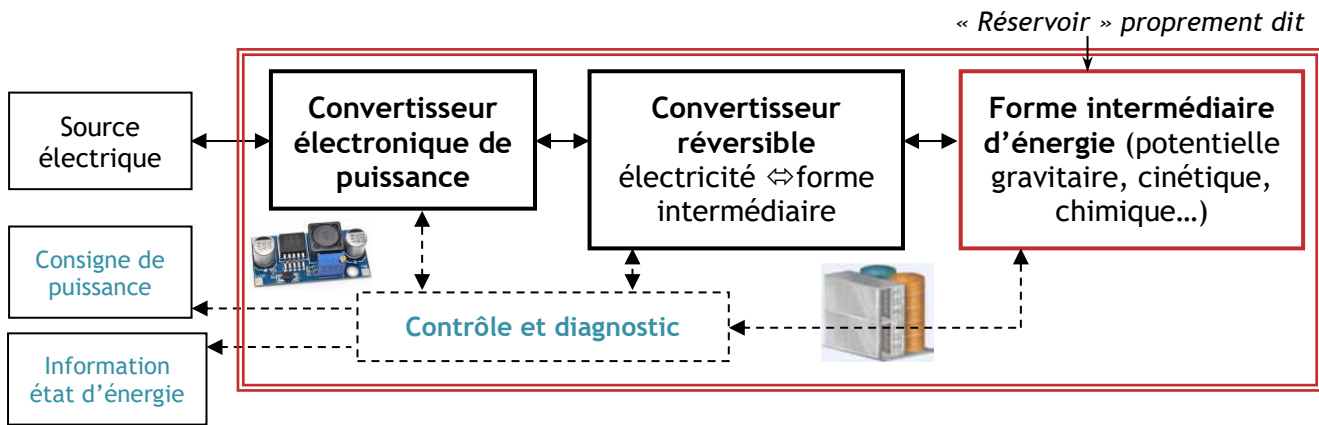


Figure 5 : Synoptique générique d'un système de stockage d'énergie électrique (SSEE), source B. Multon

3.2 - Capacité énergétique E_{stoc}

La **capacité énergétique** s'exprime en J, ou encore en kWh. C'est une grandeur fortement dimensionnante (la « taille » du réservoir d'énergie) et a priori fondamentale pour un système de stockage d'énergie. Cependant l'énergie exploitable dépend de la possibilité de soutirer toute l'énergie stockée ainsi que des pertes énergétiques.

Les systèmes de stockage peuvent être soumis à des limites pratiques de la profondeur de décharge, par exemple une batterie lithium est souvent limitée à 80%. En outre, la part réellement exploitable peut varier considérablement en fonction de la rapidité de décharge, dans les batteries électrochimiques, et du rendement de décharge. Il faut donc prêter attention à la définition de la capacité énergétique et la capacité énergétique exploitable E_{util} est très souvent inférieure à la capacité théorique.

De plus, il est usuel de parler pour les accumulateurs électrochimiques, de la capacité de stockage C_{sto} , exprimée en ampères-heures, correspondant à la quantité de charges électriques emmagasinable (en coulombs [C], 1 Ah = 3 600 C). Une relation peut être établie, de façon simplifiée, entre E_{sto} et C_{sto} en considérant que la force électromotrice (fem) ne dépend pas de l'état de charge (forte hypothèse), la capacité énergétique est alors égale au produit de la capacité (charge) par la force électromotrice. À noter qu'il existe un risque d'ambiguïté à parler de *capacité*, car les condensateurs, également dispositifs de stockage d'énergie, sont qualifiés par leur capacité (exprimée en farads [F]).

3.3 - Puissance maximale P_{max} de charge ou décharge et constante de temps τ

La **puissance maximale**, qui qualifie les performances en débit maximale d'énergie, s'exprime en watts, et dimensionne les convertisseurs des transferts d'énergie (entre forme électrique et forme intermédiaire). Il y a parfois une asymétrie entre puissances maximales de charge et de décharge.

Accroître la puissance maximale à capacité énergétique donnée, nécessite d'augmenter le dimensionnement des convertisseurs (par exemple les plaques échangeuses d'ions dans les batteries électrochimiques) du système. L'encombrement, la masse et le coût d'un système de stockage sont donc affectés par cette caractéristique. Ainsi, son énergie massique ou volumique diminue lorsque sa puissance maximale augmente.

On parle parfois également de la **constante de temps**, τ . Celle-ci correspond au temps minimal de charge/décharge, et est égale au rapport de la capacité énergétique sur la puissance maximale (ou nominale), et peut caractériser les technologies de stockage :

$$\tau = \frac{E_{util}}{P_{max}}$$

Prenons l'exemple d'un système de stockage hydraulique gravitaire, la capacité de stockage dépend de la masse d'eau et de la différence de hauteur entre les bassins haut et bas. Quant à la puissance maximale, elle dépend de la puissance des groupes réversibles, des turbines-machines électriques et des sections des canalisations (Figure 6). Il y a ainsi découplage entre la capacité énergétique et la puissance via la constante de temps ajustable au moment du dimensionnement, ce qui permet de mieux s'adapter au besoin.

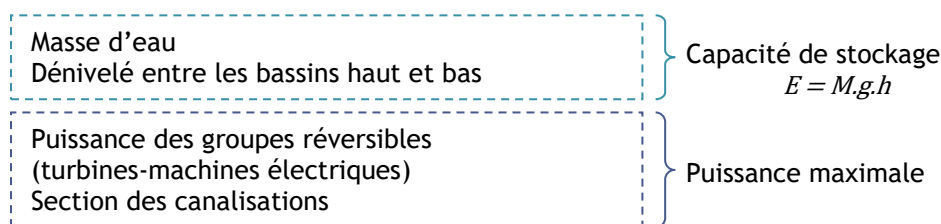


Figure 6 : Système de stockage hydraulique gravitaire

3.4 - Rendement sur cycle³

Le **rendement sur cycle** est le rapport entre l'énergie restituée durant la décharge sur l'énergie consommée lors de la charge, il dépend inévitablement de la nature du cycle (le profil temporel $P(t)$ de la puissance échangée entre le système de stockage et son environnement). Les différentes conversions d'énergie le long de la chaîne de stockage entraînent des pertes que l'on peut classer en deux catégories : pertes en charge et décharge P_{ch} , et les pertes à vide ou pertes d'autodécharge P_0 .

Pour définir rigoureusement le rendement sur cycle, il est nécessaire que l'état d'énergie de la fin d'un cycle soit égal à l'état d'énergie initial. Pour mettre en évidence ces pertes, nous proposons l'analyse simplifiée suivant, fondée sur des modélisations élémentaires des pertes.

Pertes en charge et décharge

Ces pertes peuvent, en première approximation, être supposées proportionnelles au carré de la puissance qui transite :

$$P_{ch} \cong \alpha . P^2$$

Avec P , la puissance de charge ou décharge, et α facteur dépendant de la technologie du système de stockage. La valeur de α est liée à la résistance ohmique, dans le cas des batteries électrochimiques, elle dépend alors de l'état d'énergie et du sens de transfert. En décharge, elle est minimale lorsque l'état d'énergie (SoE)⁴ est proche de 1 (ou 100%) et maximale pour les valeurs de faibles de SoE . Ce type de variation s'observe également sur d'autres systèmes de stockage. Un supercondensateur déchargé offre une tension plus faible, donc à puissance donnée, le courant est plus élevé qu'à un SoE plus important. Les pertes sont donc plus importantes.

Pertes à vide

Ces dernières dépendent généralement de l'état d'énergie du système et sont d'autant plus élevées qu'il est haut, on les représente par la fonction : $P_0(SoE)$. Par exemple, ces pertes peuvent être très faibles, de l'ordre de quelques pourcents par mois dans une batterie électrochimique, alors qu'elles peuvent être plus élevées, de quelques pourcents par heure, dans un volant d'inertie.

³ En anglais : Round trip efficiency

⁴ SoE pour State of Energy

Pertes totales P_{loss}

Considérons un cycle de fonctionnement du dispositif de stockage avec son profil de puissance $P(t)$ et un état d'énergie associée $SoE(t)$. Les pertes totales (instantanées) sont égales à la somme des pertes en charge/décharge et celles en autodécharges :

$$P_{loss} = \alpha P^2(t) + P_0(SoE(t))$$

L'énergie dissipée E_{loss} sur l'ensemble du cycle s'exprime par :

$$E_{loss} = \int [\alpha P^2(t) + P_0(SoE(t))] dt$$

Un système de stockage d'énergie est fondamentalement dissipatif donc il est un récepteur électrique. Ainsi, par convention, la puissance est positive en phase de charge, et elle est négative en phase de décharge. Le profil temporel de l'état d'énergie SoE s'exprime par :

$$SoE(t) = SoE(t_0) + \frac{\int [P(t) - P_{loss}(t)] dt}{E_{sto}}$$

Avec E_{sto} la capacité énergétique de stockage du système (SoE est une grandeur normalisée par rapport à E_{sto}). En pratique, les cycles de sollicitation $P(t)$ sont très variés.

Rendement sur cycle η_{cycle}

Le rendement sur cycle η_{cycle} est le rapport de l'énergie restituée E_d sur l'énergie absorbée E_{ch} lorsque le SoE est revenu à sa valeur de début de cycle. La figure 7 montre un exemple de cycle idéalisé et permettant d'effectuer une démonstration simple d'une expression générique du rendement sur cycle.

$$\eta_{cycle} = \frac{E_d}{E_{ch}}$$

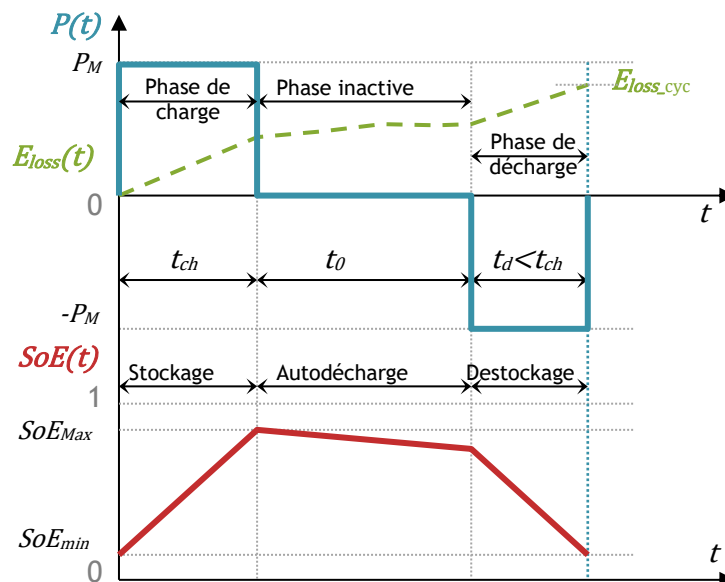


Figure 7 : Cycle simplifié d'un système de stockage d'énergie électrique : charge à P constante, repos (avec une autodécharge), décharge à P constante, source [18]

Le rendement sur cycle peut s'exprimer en fonction des rendements de charge et de décharge et du facteur d'autodécharge (voir définition ci-dessous). Les rendements énergétiques des phases de charge et de décharge sont : $\eta_{ch} = \frac{E_{ch} - E_{loss, ch}}{E_{ch}}$ et $\eta_d = \frac{E_d}{E_d + E_{loss, d}}$

Et le facteur d'autodécharge s'exprime par : $\eta_0 = \frac{\oint P_0(SoE(t)).dt}{P_M \cdot t_{ch}}$

On obtient l'expression, étonnamment simple et explicite, du rendement total sur cycle :

$$\eta_{cycle} = [\eta_{ch} - \eta_0] \cdot \eta_d$$

On peut démontrer que cette expression générale reste valable quel que soit le type de cycle, sans nécessité de la simplification précédente.

Ainsi, les durées des phases de charge, d'attente et de décharge interviennent logiquement dans le rendement global ainsi que les valeurs de puissance de charge et de décharge. En effet, à dimensionnement donné du système de stockage, avec des puissances de charge et de décharge élevées, ces phases sont plus courtes et les rendements de charge et de décharge plus faibles. Le facteur d'autodécharge, quant à lui, joue un rôle d'autant plus important que la durée de la phase à vide est longue devant les durées de charge et de décharge.

Le dimensionnement des systèmes de stockages doit donc être optimisé pour répondre aux cycles spécifiques imposés par les applications. Ainsi un système de stockage optimisé pour une faible « constante de temps » (donc avec des convertisseurs dimensionnés pour des puissances élevées) aura un meilleur rendement pour des sollicitations rapides et éventuellement une assez forte autodécharge, et un mauvais rendement sur des cycles avec de longues périodes de repos.

3.5 - Vieillessement et nombre maximal de cycles de charge-décharge (cyclabilité) N_{cycl}

Cette limitation du nombre de cycles est conséquente à des phénomènes de fatigue ou d'usure liés aux processus physiques ou chimiques en jeu. Le cyclage constitue souvent une cause de dégradation importante parfois dominante devant le vieillissement dit calendaire (terme usité dans le domaine des batteries électrochimiques mais qui peut être étendu aux autres technologies de stockage). Le vieillissement calendaire se rapporte, quant à lui, aux dégradations qui se produisent au cours du temps en l'absence même d'échanges énergétiques, la température est l'un des facteurs dominants ainsi que l'état de charge, qui lorsqu'il est élevé, augmente l'état de contrainte du réservoir d'énergie. Le vieillissement en cyclage se rapporte à des phénomènes de fatigue mécanique, comme les dilatations et contractions, et électrochimiques, c'est-à-dire aux transports de matières actives par réactions non entièrement réversibles.

Les processus de fatigue sont souvent complexes et mal connus et la durée de vie en cyclage mal définie, parfois inconnue. Le nombre admissible de cycles (correspondant à un niveau de dégradation donnée) N_{cycl} est fortement lié à l'amplitude des cycles et/ou à l'état de charge moyen. La figure 8 montre un exemple dans le cas d'un accumulateur électrochimique au lithium. On peut remarquer que le nombre de cycles peut devenir extrêmement élevé pour des cycles de faible amplitude et que la quantité d'énergie échangeable sur la vie de cet accumulateur peut être beaucoup plus élevée avec de petits cycles. Dans ce cas, le vieillissement calendaire devient souvent dominant.

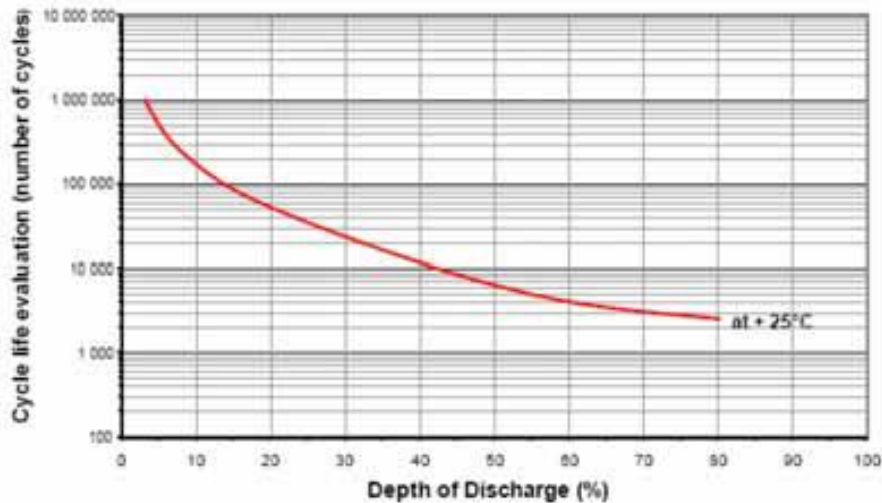


Figure 8 : Nombre maximal de cycles de charge-décharge pour une technologie électrochimique Lithium-Ion NCA, source Saft

Soumis à des sollicitations, notamment thermiques et mécaniques, les systèmes de stockage se détériorent, ils vieillissent. Leurs caractéristiques macroscopiques se dégradent, généralement la capacité énergétique diminue et les pertes augmentent. Ces dégradations accélèrent donc elles-mêmes le vieillissement en intensifiant les sollicitations, en effet à même flux d'énergie, la diminution de la capacité entraîne un cyclage plus intense et l'augmentation des pertes génère des échauffements, ce qui conduit généralement à un emballement en fin de vie si l'on maintient les mêmes types de cycles (profils temporels de puissance).

Les effets des vieillissements calendaire et en cyclage interagissent inévitablement et, dans la réalité, on ne peut pas les dissocier. Pourtant les rares modèles, considérant ces deux modes de dégradations, sont fondés sur une « simple » sommation des effets de chacun d'eux.

La maîtrise du vieillissement est absolument stratégique afin d'optimiser le dimensionnement des systèmes de stockage sur l'ensemble du cycle d'usage ainsi que leur gestion d'énergie. Les modèles de vieillissement sont inégalement connus en fonction des technologies, pour autant leur connaissance doit absolument être enrichie (voir un exemple d'application ici [19]).

3.6 - Coûts

Les coûts du stockage de l'énergie sont liés à l'amortissement de l'investissement, qui est la part la plus marquante pour l'acheteur et à ceux de fonctionnement (maintenance, pertes énergétiques, vieillissement).

Le coût d'investissement est généralement spécifié en €/kWh pour les accumulateurs à longue constante de temps (plutôt dimensionnés en énergie) ou en €/kW pour ceux à faible constante de temps (plutôt dimensionnés en puissance).

Mais pour pouvoir mieux optimiser les dimensionnements des systèmes de stockage, il faudrait tenir compte de la part dimensionnée en énergie et de celle dimensionnée en puissance et définir le coût d'investissement total comme :

$$C_{inv_tot} = C_W \cdot E_{util} + C_P \cdot P_{max}$$

avec C_W et C_P respectivement en €/kWh et €/kW, données hélas rarement disponibles et donc à construire à condition d'avoir une bonne maîtrise des constituants du système considéré. De la même façon que, à technologie et à capacité énergétique données, la masse et le volume d'un

système de stockage augmentent lorsque les exigences de puissance augmentent, son coût croît également.

Coût sur l'ensemble du cycle de vie

Dans une logique de soutenabilité (au sens du développement durable), il est nécessaire de considérer le coût sur l'ensemble du cycle de vie, incluant les dépenses de matières premières, d'énergie grise [6], l'entretien, la maintenance et autres coûts environnementaux de l'extraction des matières premières au recyclage ne passant par la phase de fonctionnement.

Les systèmes de stockage les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais. Et, en général, ce ne sont pas ces technologies qui conduisent au plus faible coût sur l'ensemble du cycle de vie.

Prenons l'exemple d'une batterie électrochimique lithium 500 €/kWh (hors électronique de puissance) dont les caractéristiques de vieillissement en cyclage ont été données à la figure 8. Avec 2500 cycles à 80% de DoD⁵ (pertes non prises en compte), le « coût d'usure » est de 0,25 €/kWh (500 € / (0,8 x 2500 cycles), avec 60 000 cycles à 20% de DoD (surdimensionnement) le « coût d'usure » devient 0,04 €/kWh (500 € / (0,2 x 60 000 cycles). Si un grand nombre de cycles est requis, il peut être plus rentable de surdimensionner la capacité de stockage, mais à condition que la durée de vie calendaire soit à la hauteur du besoin.

4 – Bilan comparatif et critères de comparaison

Les ordres de grandeurs des caractéristiques des systèmes de stockage sont indiqués dans le tableau ci-dessous pour les systèmes de stockage décrits la ressource pédagogique « *Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique* » [7]. Attention, ces données sont très approximatives et critiquables.

	Densité énergie/ puissance	« Constante de temps »	Nombre de cycles profond/durée de vie	Coût d'investissement	Rendement sur cycle	Degré de maturité *
Hydraulique gravitaire	(réservoirs) 270 Wh/m ³ /(100m)	1 h à 100 h	> 50 ans	0,5 à 1,5 €/W	60% à 85%	A
Magnétique supraconducteur	qq Wh/kg	qq s à qq min	~20 ans	1 s : ~0,3 €/W 30 s : ~6 €/W	90% à 95%	C
Volant d'inertie	qq Wh/kg	qq 10 s à 1 h	10 ⁵ à 10 ⁶ ~20 ans	20 s : 50 €/W ou 0,25 €/W 15 min : ~10 €/W ou 2€/W	90% à 95%	B
Hydropneumatique	qq 10 Wh/dm ³	qq h à qq 10 h	?	~1 €/W	60% à 75%	C
Air comprimé caverne adiabatique	(caverne) 10 Wh/dm ³ (200 bars)	14 h à qq 10 h	?	0,6 à 1,2 €/W	~ 70%	D+
Thermodynamique haute température	(réservoirs) ~250 Wh/dm ³	qq 10 h	?	~0,5 €/W ?	~ 70%	D-

⁵ DoD : Depth of Discharge ou profondeur de décharge

Electrochimique plomb-acide	20 à 30 Wh/kg	10 min à qq 10 h	500 à 4000 ou 7 à 15 ans	0,2 €/Wh + 0,8 €/W	~ 70%	A
Electrochimique nickel	40 à 60 Wh/kg	qq min à qq 10 h	qq 1000 ou 20 ans	1 €/Wh ou 0,8 €/W	~ 70%	A
Electrochimique lithium	70 à 140 Wh/kg	qq min à qq 10 h	qq 1000 à 10 000 ou 20 ans	0,3 à 0,4 €/Wh + 0,4 €/W	~ 80% à 85%	A
Electrochimique NaS	70 Wh/kg	qq h	~5000 30 ans	0,3 €/Wh + 0,8 €/W	~ 75%	B
Batteries à circulation	(réservoirs)~ 15 à 40 Wh/kg	qq h	~15 ans	0,1 à 0,4 €/Wh + 0,4 €/W	~ 75% à 80%	C
Hydrogène	~500 Wh/kg	qq h à qq 10 h	5 à 10 ans	?	~ 20% à 40%	C
Super-conducteurs	~5 Wh/kg	qq s à qq min	10 ⁵ à 10 ⁶ ~15 ans	15 €/Wh + 0,7 €/W	~ 85% à 95%	B

Figure 9 : Tableau comparatif approximatif des caractéristiques des différents systèmes de stockage, source [18]

* Degré de maturité : A élevé, B des applications et des démonstrateurs, C des démonstrateurs, D conceptuel

Le **coût énergétique de fabrication** ou énergie grise [6] est un critère important à observer dans un contexte de développement soutenable. Pour ce critère, sont comparées l'énergie dépensée sur cycle de vie [MJ] et la puissance stockable [kWh]. Il s'avère que le stockage est très coûteux dans une analyse sur cycle de vie (figure 10).

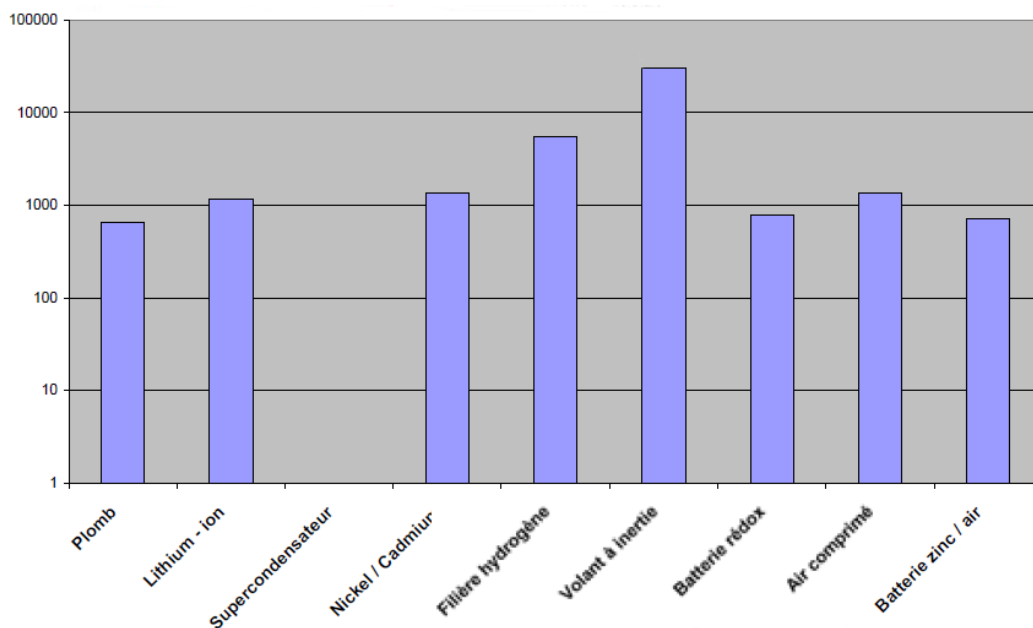


Figure 10 : Coût énergétique de fabrication (énergie grise) des systèmes de stockage [MJ/kWh stockable], source [20]

Le **compromis énergie/puissance** est un autre critère de comparaison des technologies entre elles. En effet, dans le cas des systèmes de stockage embarqués, la masse et le volume sont des caractéristiques prépondérantes. Le diagramme de Ragone (figure 11) montre les caractéristiques de puissance et d'énergie massiques dans un même plan. Il permet de comparer les solutions et notamment de mettre en évidence que, pour une même famille technologique, l'accroissement de la puissance massique se fait aux dépens de l'énergie massique. La figure 12, quant à elle, permet de comparer un panel de solutions plus étendu, mais attention la comparaison est très critiquable

dans le sens où ne sont pas comptabilisés les convertisseurs d'énergie, ni leurs rendements, dans le cas des hydrocarbures liquides, du gaz naturel (méthane) et de l'hydrogène.

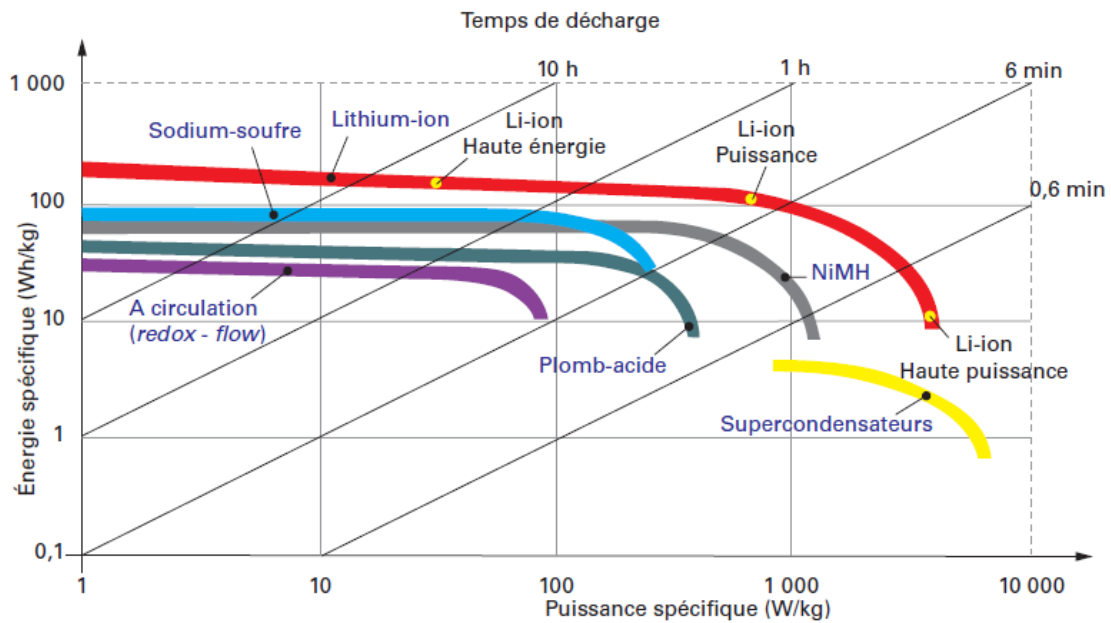


Figure 11 : Diagramme de Ragone pour quelques technologies électrochimiques et super-condensateurs, source [18]

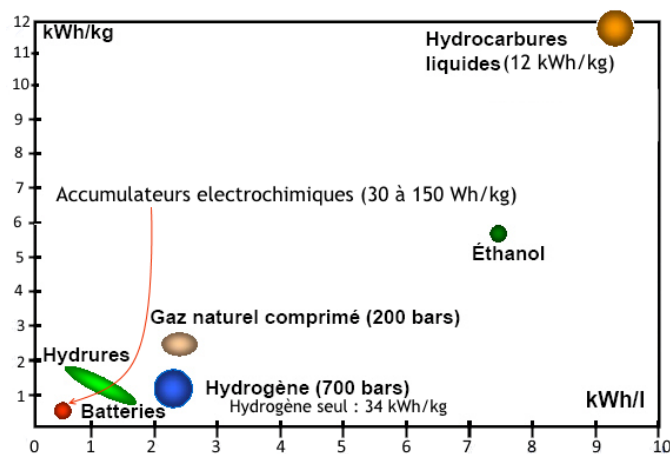


Figure 12 : Énergie massique et volumique des systèmes de stockage, source [21]

Dans les applications stationnaires, la superficie occupée de l'ensemble du système de stockage peut devenir un critère important, on s'intéresse alors plutôt à l'énergie ou la puissance surfacique (kWh/m^2 ou kW/m^2).

Le coût d'investissement du kWh stocké ou du kW pour un dimensionnement en puissance est un critère regardé avec attention par l'acheteur. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, des systèmes moins onéreux à l'investissement peuvent se détériorer rapidement en cyclage, et révéler un rendement médiocre.

Le diagramme figure 13 propose de comparer, toujours très approximativement, les principales technologies dans le plan « constante de temps » - puissance maximale. Les traits pointillés représentent des systèmes peu développés ou en cours de développement.

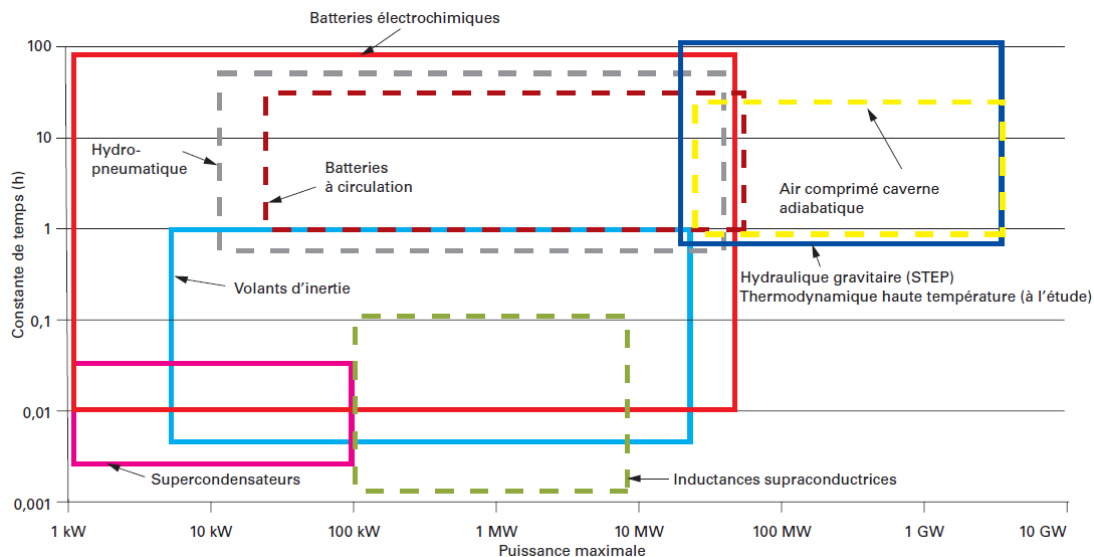


Figure 13 : Comparatif très approximatif des principales technologies de stockage d'énergie électrique, source [18]

5 – Conclusion

La part croissante de l'énergie électrique à l'échelle mondiale et l'émergence de sa production par des énergies renouvelables et variables, donnent au stockage d'énergie électrique un rôle important, voire crucial, tant dans le domaine des transports (électrification) que dans celui du système de production-distribution. Différentes technologies coexistent, avec des caractéristiques souvent complémentaires. Les systèmes de stockage sont déjà rentabilisables dans bon nombre d'applications et devraient encore progresser car les coûts continuent à baisser rapidement [22]. Mais seule une optimisation de leur dimensionnement sur l'ensemble du cycle de vie, intégrant la dimension système dans lequel le système de stockage d'énergie s'insère, permettra d'accélérer son développement. Mais cela exige en particulier d'améliorer la modélisation de leurs des pertes énergétiques et de leur vieillissement.

Les critères de coûts économiques sont encore incertains, notamment selon le degré de maturité technologique et les perspectives de marché, c'est pourquoi nous pensons qu'il est indispensable de s'appuyer sur des critères de coûts environnementaux, comme l'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie ainsi que sur les quantités de matières premières, surtout si elles sont rares, pour entreprendre sur des bases plus objectives les conceptions et dimensionnements des systèmes de stockage et, de façon plus générale, de tous les systèmes énergétiques.

Références :

[1]: Ecole Normale Supérieure de Rennes, département Mécatronique, <http://www.mecatronique.ens-rennes.fr/>

[2]: Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE), Pôle Composants et systèmes pour l'Energie électrique (CSEE), Groupe Systèmes d'Energie pour les Transports et l'Environnement (SETE), <http://satie.ens-paris-saclay.fr/version-francaise/la-recherche/pole-csee-composants-et-systemes-pour-l-energie-electrique/groupe-sete-systemes-d-energies-pour-les-transports-et-l-environnement/>

[3]: Energétique électrique, B. Multon, cours de l'ENS Rennes, 2017, <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-01246815v2>

- [4]: Stocker l'électricité : oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment ? B. Multon et J. Ruer, Publication ECRIN en contribution au débat national sur les énergies, avr. 2003, <http://ecrin.asso.free.fr/pdf/energies.pdf>
- [5]: Ressources énergétiques et énergie électrique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, octobre 2018, Ressource Culture Sciences de l'Ingénieur, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/ressources-energetiques-et-energie-electrique
- [6]: Conversion d'énergie et efficacité énergétique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, septembre 2018, Ressource Culture Sciences de l'Ingénieur, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique
- [7]: Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, 2019, Ressource Culture Sciences de l'Ingénieur, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/technologies-des-systemes-de-stockage-de-lenergie-electrique
- [8]: Le stockage d'énergie pour le vecteur électricité, J. Perrin, F. Cuevas, B. Multon, Colloque du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS, Montpellier, mars 2011, http://energie.promes.cnrs.fr/IMG/pdf/Atelier_Vecteur_electricite_JP.pdf
- [9]: Centrale thermique de Fiddlers Ferry en Grande-Bretagne, Alan Godfree, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7937443>
- [10]: Centrales solaires PS10 et PS20 en Espagne, Koza1983, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7008971>
- [11]: Parc éolien de Middelgrunden au Danemark, Stig Nygaard, Copenhagen, Denmark-Boattrip 2009, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10677726>
- [12]: Epreuve S21, concours SPI Centrale-Supélec, 2011, « Production électrique et régulation du réseau français »
- [13]: Ligne haute tension sortie de la centrale de Fessenheim en France Jean-Pierre Daniel – Travail personnel, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=432966>
- [14]: Arnaud 25, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=21316698>
- [16]: RTE Eco2mix, <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/>
- [15]: Energies renouvelables et véhicules électriques à batterie ou à pile à combustible et hydrogène, B. Multon, H. Horsin Molinaro, novembre 2018, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/energies-renouvelables-vehicules-electriques-a-batteries-ou-a-pile-a-combustible-et-hydrogene
- [17] : Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de O. Gergaud, 2002, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00439079/document>
- [18]: Systèmes de stockage d'énergie électrique, B. Multon, J. Aubry, P. Haessig et H. Ben Ahmed, Techniques de l'Ingénieur BE8100 2013
- [19]: T. KOVALTCHOUK, B. MULTON, H. BEN AHMED, J. AUBRY, P. VENET, "Enhanced Aging Model for Supercapacitors taking into account Power Cycling: Application to the Sizing of an Energy Storage System in a Direct Wave Energy Converter", IEEE Trans. Industry Applications, may/june 2015, pp.2405-2414. Accessible sur la base HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01160366>
- [20]: Program INVESTIRE (Investigation of storage technologies for intermittent renewable energies: evaluation and recommended r&d strategies) Thematic Network 2001-2003, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/56929/factsheet/en>
- [21]: A. Rojey IFP, ECRIN 2006
- [22]: Lazard Bank, Lazard' Levelized Cost of Storage Analysis Version 4.0, nov. 2018. <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018/>
- Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>