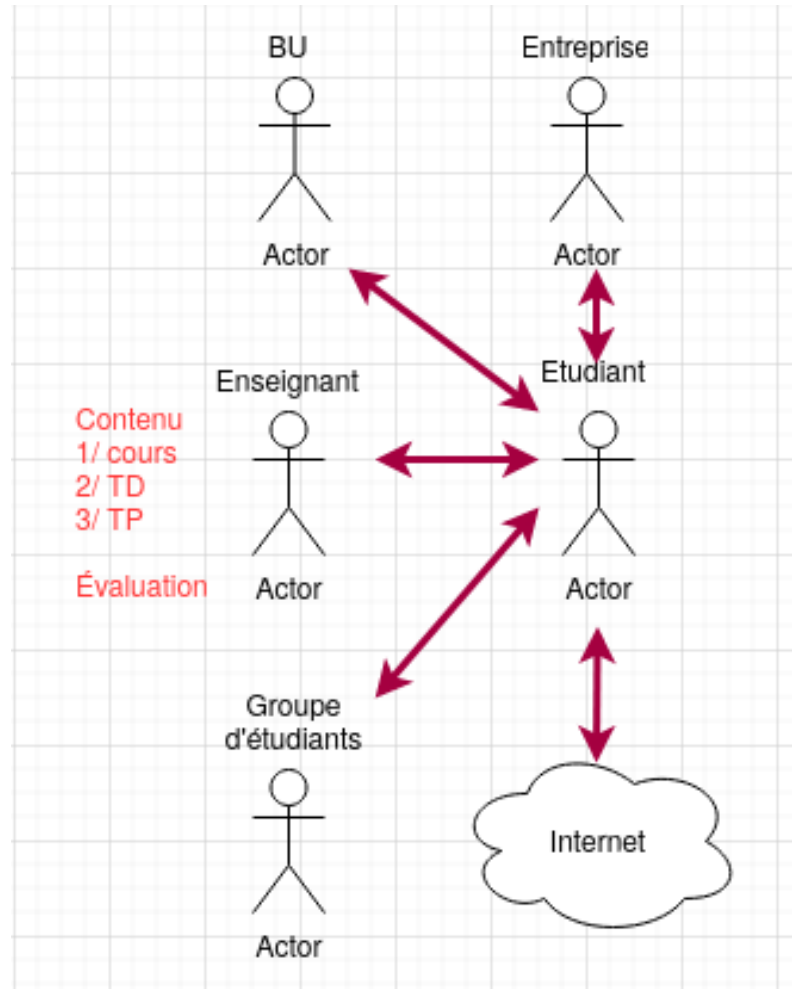


Gestion d'énergie et Autonomie des systèmes embarqués

Gestion d'énergie et Autonomie des systèmes embarqués

- 8 heures de cours
- 8 heures de TD
- 8h de TP
- 2 ECTS (*European Credit Transfer and Accumulation System*)/60
- Contrôle continu 100 % écrit (1^{ère} session)
- Contrôle continu 100 % écrit (2^{nde} session)

Le socio-constructivisme



Le stockage d'électricité embarqué

- La batterie au plomb a été inventée en 1859
 - Problème de la batterie : densité d'énergie très faible par rapport aux hydrocarbures....

Le pétrole est vraiment moins cher !



Puissance moyenne d'un
cycliste : 175W
Journée de travail : 8 heures
=> Puissance fournie : 1400Wh
Salaire : 10€/heure
=> Prix : 80€ pour 1,4kWh soit

57€/kWh

Le pétrole est vraiment moins cher !



Puissance moyenne d'un cycliste : 175W
Journée de travail : 8 heures
=> Puissance fournie : 1400Wh
Salaire : 10€/heure
=> Prix : 80€ pour 1,4kWh soit

57€/kWh



1 litre de pétrole $\approx$ 10kWh

1 litre de pétrole = 4,25€ (dans une grande surface)

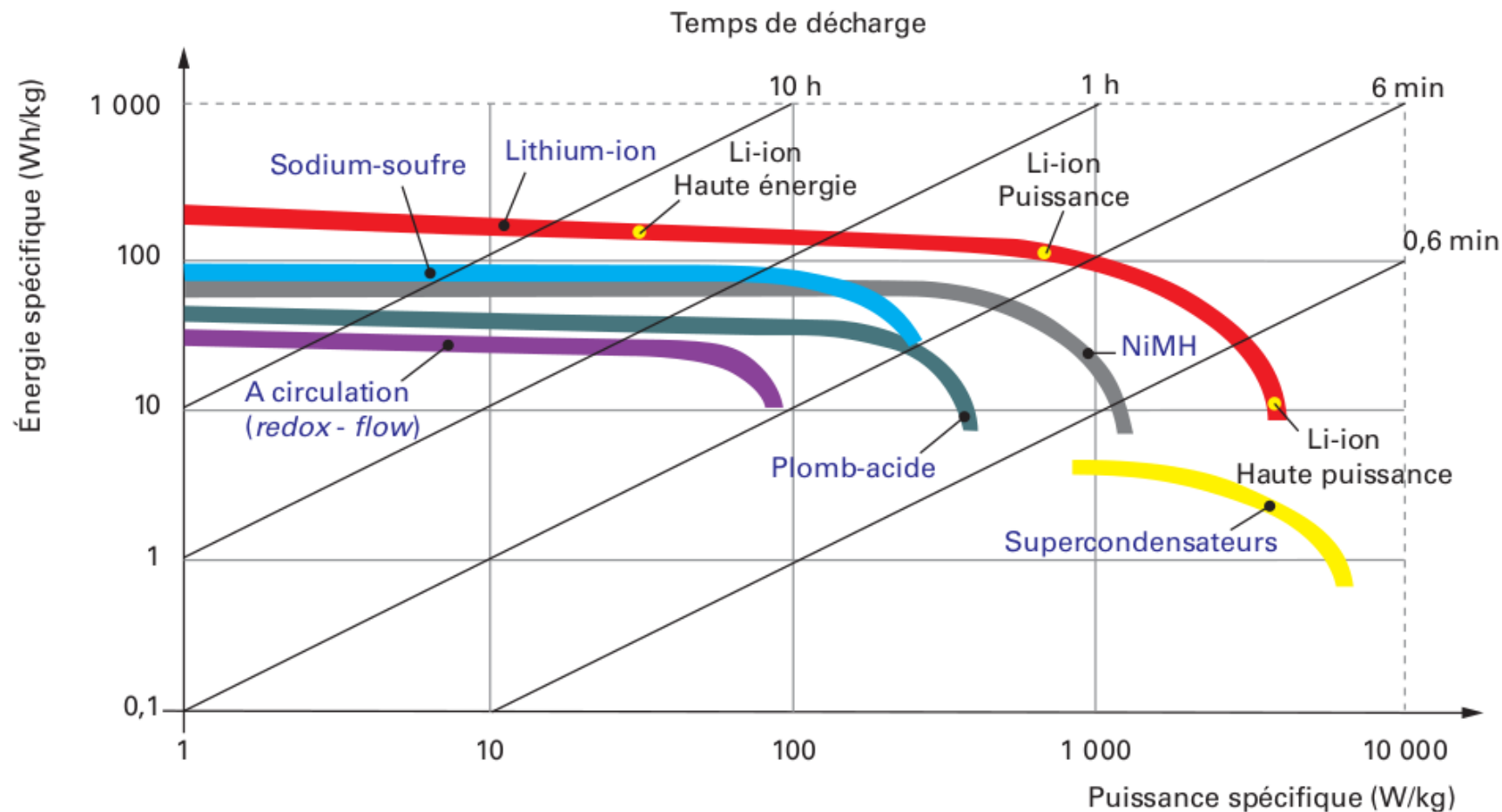
=> Prix : 4,25€ pour 10kWh soit

0,425€/kWh

Le stockage d'électricité embarqué

- La batterie au plomb a été inventée en 1859
 - Les technologies ont évolué : voitures hybrides, voitures électriques,....

Le stockage d'électricité embarqué



Le stockage d'électricité embarqué

Surtout lorsqu'il s'agit d'applications embarquées, la masse et le volume sont des caractéristiques importantes. De ce point de vue, les technologies électrochimiques offrent les meilleures performances avec des énergies massiques qui atteignent les 200 Wh/kg, même si nous les trouvons encore souvent insuffisantes.

La batterie plomb-acide

Il existe une variété assez importante de technologies plomb-acide optimisées pour répondre à différentes exigences en termes de compromis durée de vie, coût d'investissement et « constante de temps ». Les électrodes sont principalement constituées, pour l'une, de plomb, et pour la seconde, d'oxyde de plomb tandis que l'électrolyte est un mélange d'acide sulfurique (SO_4) et d'eau. Les problèmes d'évaporation de l'eau, et d'électrolyse en cas de surcharge, conduisent à de fréquents besoins de maintenance (par exemple une fois par mois selon conditions de température sachant qu'une augmentation de 10°C multiplie par 5 la vitesse de perte d'eau) dans le cas des batteries ouvertes. En revanche, les batteries fermées de type VRLA (Valve Regulated Lead Acid) à soupape de sécurité et avec un électrolyte gélifié sont sans entretien, avec des durées de vie qui peuvent atteindre 20 ans. La constitution des électrodes positives donne lieu à deux familles technologiques, celles à « plaques planes » et celles à « plaques tubulaires », plus robustes. La tension d'un élément est d'environ 2 V et dépend de l'état de charge et de la température ($+ 1,8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$). La variation de tension peut donc être exploitée pour déterminer l'état de charge, à condition de mettre en œuvre une compensation en température.

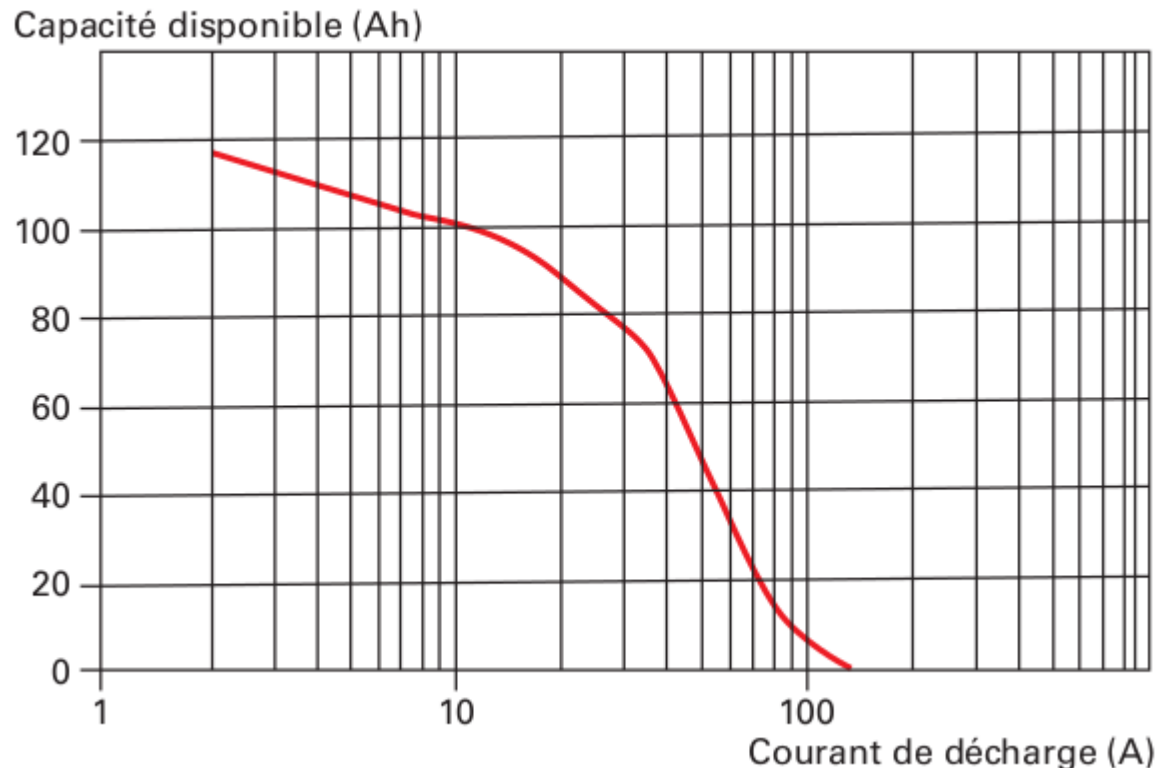
La batterie plomb-acide

La capacité disponible dépend, comme dans toutes les technologies électrochimiques, de la tension d'arrêt de décharge. Elle est également très sensible à la température (à -20°C , elle ne vaut plus qu'environ 40 % de sa valeur nominale) et comme la résistance interne augmente aux basses températures, la puissance maximale est également affectée. Un autre phénomène, particulièrement marqué dans les batteries au plomb, est une très forte dépendance de la capacité disponible au régime de décharge.

La batterie plomb-acide

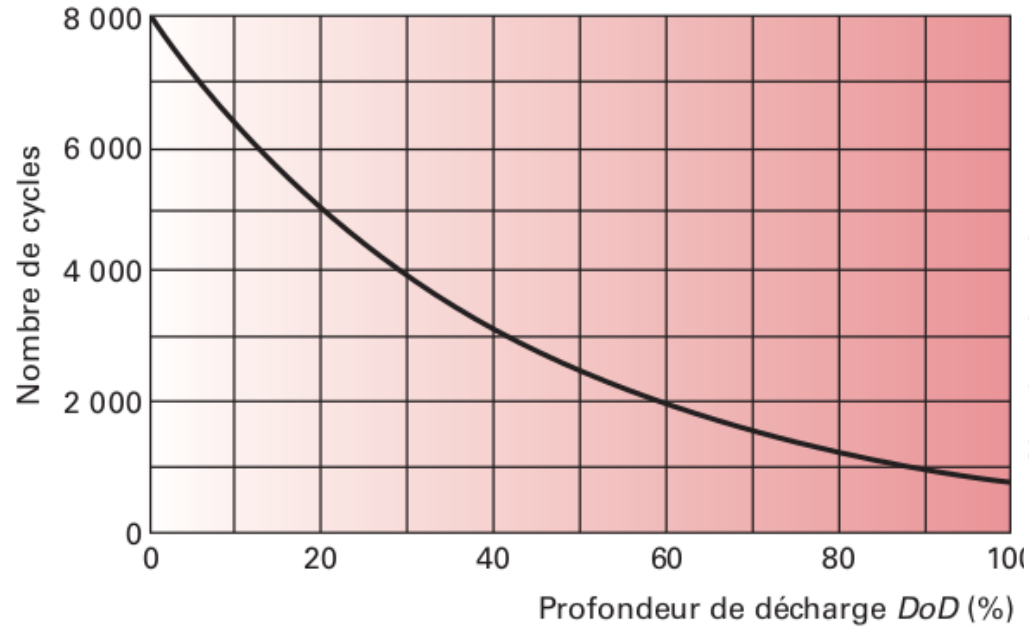
La capacité disponible dépend, de la tension d'arrêt de décharge 20°C, elle ne vaut plus qu'environ interne augmente aux basses températures affectée. Un autre phénomène, est une très forte dépendance

Batterie 90Ah

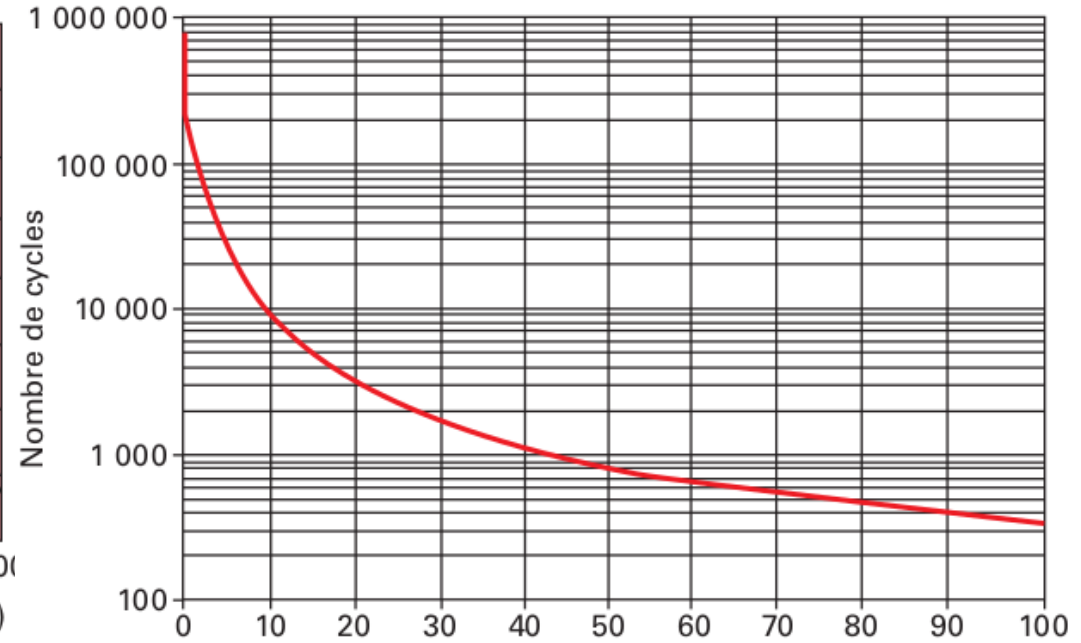


On constate que la capacité disponible passe de près de 120 Ah (décharge à 2 A, C/45) à environ 10 Ah pour une décharge à 90 A (1C).

La batterie plomb-acide



(a) VRLA Absolyte IIP d'Exide



Profil de charge :
limite courant à 1C
limite tension 2,45 V (16 h)

Profondeur de décharge DoD (%)

(b) batteries ouvertes Genesys Purelead d'Energys

La batterie plomb-acide

L'influence du nombre de cycle charge/décharge

En ce qui concerne le vieillissement en cyclage, la figure précédente montre deux exemples de courbes du nombre de cycles en fonction de la profondeur de décharge pour des décharges partant de la pleine charge à une température de 25°C (VRLA Exide et batteries ouvertes Enersys). Dans le cas de la technologie Exide (VRLA), les nombres de cycles donnés pour un DoD (Depth of Discharge ou profondeur de décharge, $\text{DoD} = 1 - \text{SoC}$) inférieur à 30 % correspondent au vieillissement calendaire avec un cycle par jour. Par définition, le nombre maximal spécifié de cycles correspond à une dégradation de 20 % de sa capacité initiale. Une particularité des batteries au plomb est que la capacité échangeable sur leur vie ($C_{\text{nom}} \cdot N_{\text{cycl}} \cdot \text{DoD}$) est sensiblement constante quelle que soit la profondeur de décharge.

La batterie plomb-acide

L'influence de la température

Bien sûr, comme pour toutes les autres technologies électrochimiques, la température joue un rôle important sur la durée de vie. Approximativement, la durée de vie est divisée par deux pour chaque accroissement de 8 °C de la température, que son origine soit externe (ambiance) ou interne (pertes) ; les régimes de charge et décharge influent donc sur la durée de vie. Lorsque le vieillissement en cyclage est dominant, la température accroît la dégradation ; ainsi le fabricant EnerSys fournit une loi empirique qui indique une réduction d'environ 18 % du nombre maximal de cycles pour toute augmentation de 10 °C, au-delà de 25 °C.

Technologies à base de nickel

Il s'agit des technologies nickel-cadmium (NiCd) et nickel-métal-hydrures (NiMH), qui fournissent, dans les deux cas, une force électromotrice par élément d'environ 1,2 V. Les performances massiques sont jusqu'à deux fois plus élevées que celles du plomb acide et les performances en puissance peuvent être excellentes

Les technologies NiCd

Les technologies NiCd, après avoir satisfait la demande en petits accumulateurs pour les applications électroniques grand public, sont aujourd'hui bannies de ce domaine à cause de la toxicité du cadmium et ne sont autorisées que pour des usages professionnels. Actuellement, cette technologie est typiquement utilisée dans les chariots de manutention comme elle l'a été dans les véhicules électriques de la fin du XXe siècle.



Les technologies NiMH

La technologie **NiMH** a remplacé partiellement celle de type NiCd sur le marché grand public. Elle permet de se passer du cadmium tout en augmentant l'énergie massique, passant de 60 à 80 Wh/kg, et en doublant quasiment l'énergie volumique. Elle sert également de « batterie de puissance » dans les chaînes de traction hybride de Toyota.



Technologies lithium

Les technologies lithium, bien plus jeunes que les deux précédentes (apparition dans les années 1990, mais en petites capacités et puissances), sont nombreuses et nous nous restreignons ici à un très bref panorama de leurs caractéristiques majeures et de leurs applications. Nous considérons les technologies suivantes selon les cathodes (positives), sachant que les anodes (négatives) peuvent être de type carbone (LiC6 , notées LiC dans la suite) ou titanates (LTO) :

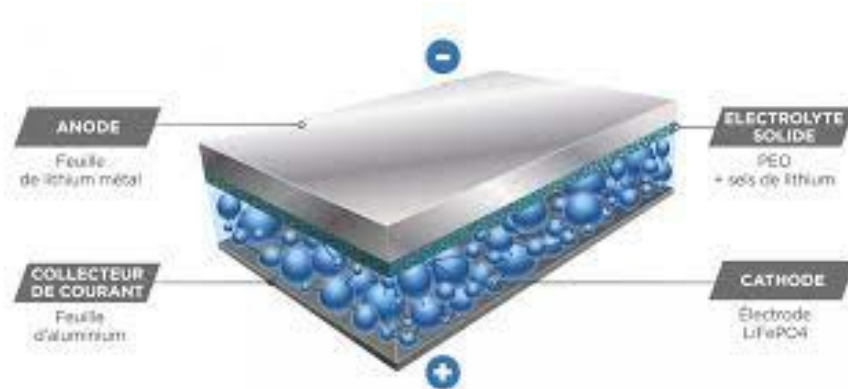
- NCA : $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$;
- NMC : $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$;
- LFP : LiFePO_4 ;
- LMO : LiMn_2O_4 ou $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{3/2}\text{O}_4$;
- LMP : lithium métal polymère.

Selon les technologies, de 100 à 400 g de lithium métal sont requis par kWh de capacité de stockage. Les forces électromotrices d'un élément sont comprises entre 2,1 V (LFP-LTO) et 3,8 V (LMO-LiC), en passant par 3,3 V (LFP-LiC). Quant aux valeurs d'énergie massique, elles varient, respectivement pour des cellules seules ou pour des packs de grosse capacité, entre 70 ou 45 (techno LFP-LTO) et 180 ou 120 Wh/kg (techno NCA-LiC).

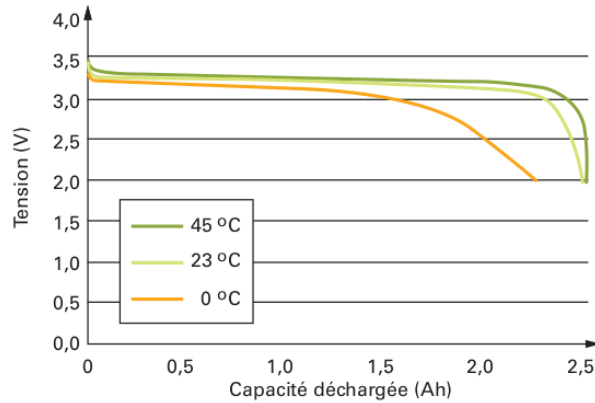
La technologie LMP

La technologie LMP, développée par très peu de fabricants, est entièrement solide et ne présente pas de risque d'explosion. Elle offre une densité d'énergie élevée d'environ 100 Wh/kg (en pack). Mais son principal inconvénient est sa température de fonctionnement optimale aux alentours de 60 à 80 °C.

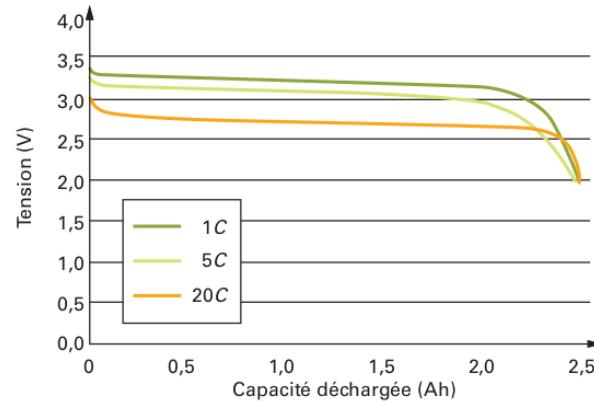
Le fabricant Batscap produit cette technologie pour des véhicules électriques (Bluecar) avec un modèle 30 kWh-45 kW (durant 30 s), ses performances en durée de vie permettent d'envisager de parcourir 200 000 km.



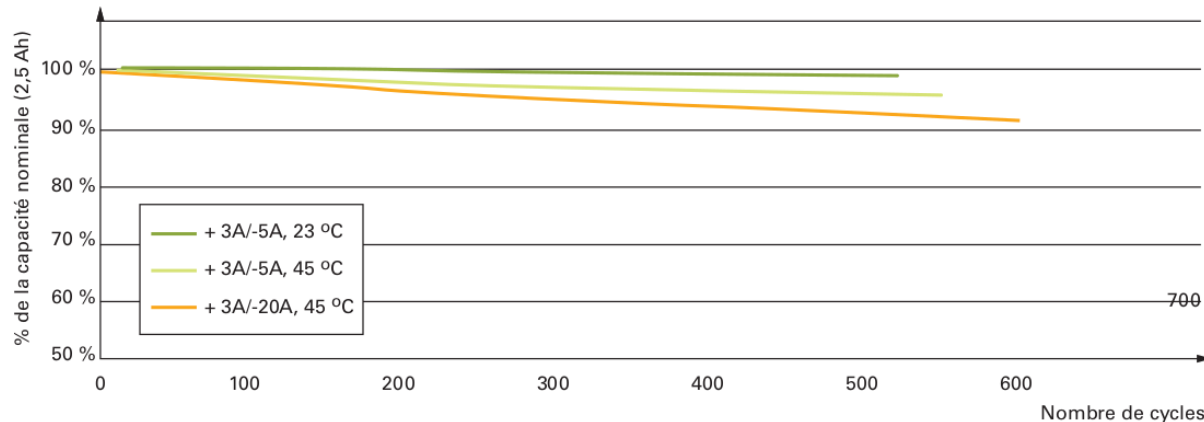
La technologie LFP



(a) décharges au régime 1C à différentes températures



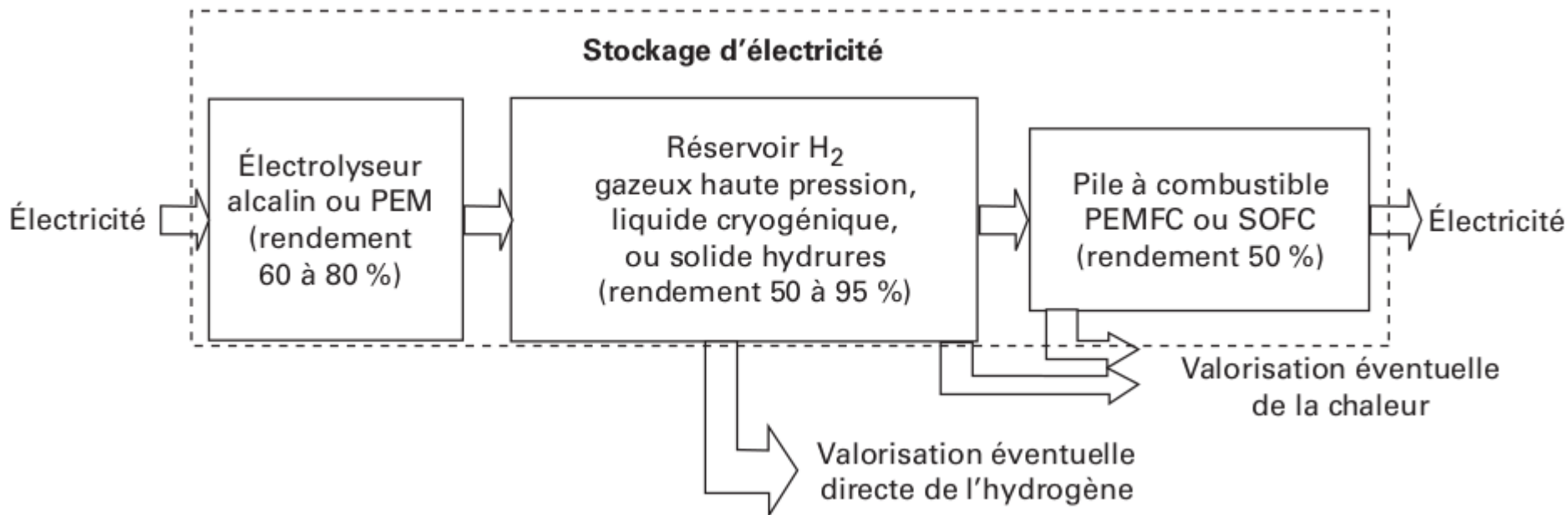
(b) décharges à 23 °C à différents régimes (1C à 20C)



(c) performances en cyclage (décharges à 100 % de DoD) en fonction de la température et du régime de charge/décharge

Stockage via l'hydrogène

La solution retenue ici consiste à associer un électrolyseur pour convertir l'électricité en hydrogène, un dispositif de stockage d'hydrogène et une pile à combustible pour la conversion en électricité de l'hydrogène et de l'oxygène récupéré lors de l'électrolyse ou pris dans l'air



Supercondensateurs

Les condensateurs sont, avec les inductances, les moyens de stockage d'électricité les « plus directs ». L'énergie qu'ils accumulent est proportionnelle au carré de la tension, ce qui nécessite également un convertisseur d'adaptation :

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V_c^2$$

