

Lycée(s)	Général	Technologique	Professionnel	
Niveau(x)	CAP	Seconde	Première	Terminale
Enseignement(s)	Commun	De spécialité	Optionnel	
Physique-chimie				

L'essentiel sur le stockage de l'énergie électrique

Ce document traite le module spécifique « stocker de l'énergie à l'aide d'un système électrochimique » issu des nouveaux programmes de terminale bac professionnel en physique-chimie. Plus précisément, des notions liées aux piles électrochimiques et accumulateurs seront abordées. Des activités expérimentales caractérisant et illustrant l'ensemble de ces notions seront proposées.

Mots-clés

Pile électrochimique - accumulateur - stockage énergétique - énergie - capacité - oxydoréduction - développement durable

Références au programme

Électricité : Comment obtenir et utiliser efficacement l'énergie électrique ?

Stocker l'énergie à l'aide d'un système électrochimique.

Groupements 2 à 6.

Lien avec les autres modules

Chimie : Comment analyser, transformer ou exploiter les matériaux dans le respect de l'environnement ? Prévoir une réaction d'oxydoréduction et protéger les métaux contre la corrosion.

Groupements 1 et 2.

Introduction

Il existe deux formes de stockage d'énergie :

Le **stockage embarqué** : il parsème notre quotidien dans les applications mobiles (batteries pour les véhicules, batteries de téléphones, etc.). Ces systèmes présentent de petites capacités, de l'ordre du kilowattheure (kWh)¹.

Le **stockage stationnaire** : le stockage de l'électricité contribue à assurer l'équilibre entre production et consommation d'électricité sur les réseaux. On stocke de l'énergie en période creuse ou de forte production, afin de la restituer plus tard en cas de demande élevée ou de production plus faible. Ces systèmes de stockage sont de capacités variables (de quelques kWh à plusieurs GWh).

Le stockage d'électricité est devenu un défi majeur de la transition énergétique au niveau mondial : c'est une des conditions indispensables à l'essor des énergies renouvelables (solaire et éolienne), dont la production est intermittente.

¹ le wattheure peut également s'écrire watt heure ou watt-heure et le symbole peut être Wh ou W·h ; l'écriture sans séparation est ici adoptée en cohérence avec le programme officiel.

Selon le GWEC (conseil mondial de l'énergie éolienne), environ 3 % de la puissance électrique mondiale produite est emmagasinée dans des installations électriques de stockage stationnaire. À titre d'exemple, l'entreprise Tesla a implanté un des plus grands systèmes mondiaux de stockage d'énergie renouvelable sur batterie lithium-ion d'une puissance de 100 MW en Australie en 2017. L'installation est connectée à un parc éolien qui alimente ainsi 30 000 foyers et assure un accès continu à l'énergie électrique.

D'après les prévisions des analystes, le marché mondial du stockage de l'énergie devrait bondir continument et se chiffrer en centaines de milliards de dollars en 2040. À cette date, le stockage pourrait concerner 6 % de la production électrique planétaire. Cela va de pair avec l'anticipation d'une forte croissance de la capacité de stockage, qui devrait passer de moins de 10 GWh en 2019 à plus de 1 000 GWh en 2040 selon Bloomberg NEF.

Piles électrochimiques

L'électrochimie est une discipline qui rassemble les domaines de l'électricité et de la chimie. Elle décrit les conversions entre énergie électrique et énergie chimique.

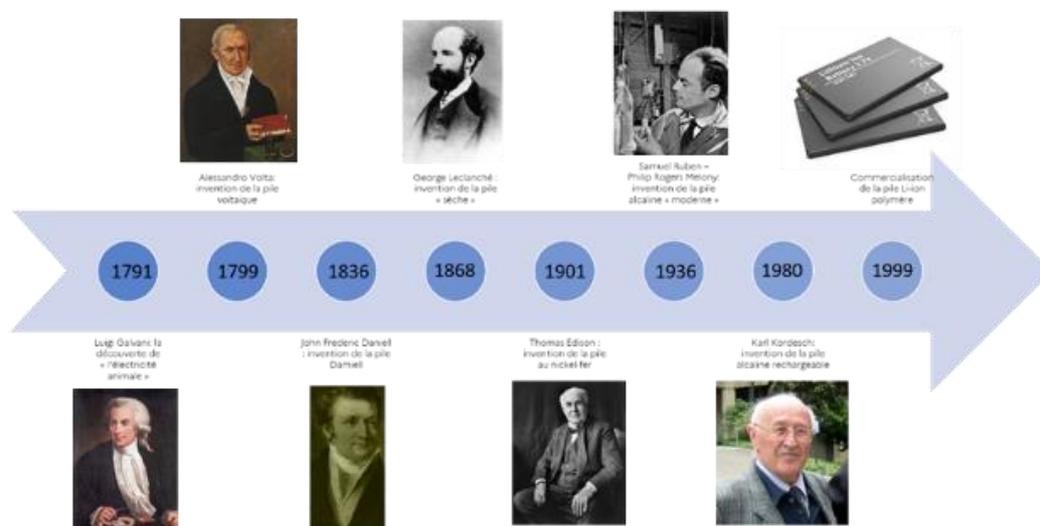
Principe général de fonctionnement

Les piles sont des générateurs électrochimiques compartimentés dont les deux extrémités sont nommées électrodes : l'anode (borne positive) et la cathode (borne négative). Ces extrémités sont composées de matériaux conducteurs (métaux, carbone). Les réactions chimiques se déroulant aux électrodes sont des réactions d'oxydo-réduction. Elles font intervenir des couples, formés par un oxydant et son réducteur (couple redox). Des transferts de charges s'opèrent d'une borne à l'autre de la pile électrochimique grâce à un matériau conducteur ionique, qualifié d'électrolyte, en contact avec les électrodes. Les piles électrochimiques sont caractérisées par leur force électromotrice, leur tension à vide et leur résistance interne.

Walther Hermann Nernst, physicien, chimiste allemand, et lauréat du prix Nobel de chimie en 1920, établit une équation traduisant le potentiel d'équilibre d'une électrode en fonction du potentiel standard du couple redox mis en jeu. La valeur du potentiel d'oxydoréduction du couple de chaque électrode est ainsi accessible.

Lors de la décharge de la pile, le potentiel des deux électrodes présentes tend à s'équilibrer. Lorsque l'équilibre est atteint, il n'y a plus de différence de potentiel et donc la tension électrique est nulle : la pile est déchargée.

Évolution des piles au cours du temps



Nous retrouvons à l'heure actuelle, dans notre quotidien :

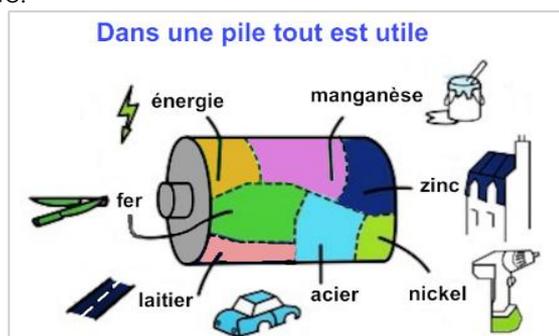
- les piles alcalines, qui tirent leur nom du fait que les électrodes (électrode négative en zinc et électrode positive en dioxyde de manganèse) sont plongées dans un électrolyte alcalin d'hydroxyde de potassium.

Les piles alcalines trouvent leurs usages pour des appareils à moyenne consommation d'énergie : télécommandes, calculatrices, réveils... Les types de piles alcalines les plus connues sont les piles AA (LR6), AAA (LR03), C (LR14), D (LR20) avec une tension de 1,5 V et E (LR22) avec une tension de 9 V.

- les piles au lithium, qui possèdent une anode en lithium ou en composé de lithium. Le matériau le plus fréquemment utilisé avec le lithium est le dioxyde de manganèse (MnO_2). Selon leur conception et les matériaux utilisés, leur tension nominale varie de 1,5 V à 3,7 V. Elles sont utilisées couramment dans les appareils électroniques, les appareils photos.

Recyclage des piles et accumulateurs

Les piles et accumulateurs, utilisés par les ménages et les professionnels, contiennent des substances dangereuses pour l'environnement et la santé (nickel, cadmium, plomb, lithium...). Une filière spécifique de collecte et de traitement, par recyclage, de ces déchets a été instaurée en Europe dès 1991 sur le principe de responsabilité élargie des producteurs pour la gestion de la fin de vie des piles et accumulateurs qu'ils mettent sur le marché.



1 570 millions de piles et accumulateurs tous types confondus, représentant 272 975 tonnes, ont été mis sur le marché en France en 2020, soit une hausse de 4 % par rapport à 2019. 188 579 tonnes de déchets de piles et accumulateurs ont été collectées en France en 2020 (principalement des accumulateurs au plomb), soit près de 19 fois le poids de la Tour Eiffel et près de 4 fois le poids du Titanic ! Cela correspond à une augmentation de 2 % par rapport à 2019. Les résultats progressent annuellement avec, en 2019, un taux de collecte supérieur à l'objectif européen (45 %) : 49 % des piles et accumulateurs mis sur le marché français ont été recyclés par la filière.

Accumulateurs : caractéristiques et principe de fonctionnement

Différence entre pile électrochimique et accumulateur

Dans le langage courant, il n'est pas rare d'employer les termes « pile » et « accumulateur » pour désigner la même chose. Si piles et accumulateurs sont tous les deux des transformateurs d'énergie chimique en énergie électrique et remplissent le même rôle (faire fonctionner des appareils électriques), il existe une différence notable entre les deux au niveau de leur durée de vie. Dans une pile, lorsque les réactifs chimiques introduits lors de la fabrication sont épuisés, on doit remplacer la pile par une neuve. Une fois déchargée, elle ne peut être réutilisée. En revanche, un accumulateur peut être rechargé presque indéfiniment. Grâce à un chargeur spécifique, l'accumulateur peut être alimenté en énergie qui sera ensuite restituée pour le fonctionnement de l'appareil dans lequel il est installé. Piles et accumulateurs diffèrent donc fondamentalement par leur réversibilité. Le concept de pile rechargeable est donc un abus de langage : c'est en fait accumulateur.

Pile électrique :

énergie chimique $\xrightarrow{\text{décharge}}$ énergie chimique

Accumulateur :

énergie chimique $\begin{matrix} \xrightarrow{\text{décharge}} \\ \xleftarrow{\text{charge}} \end{matrix}$ énergie chimique

Une batterie désigne techniquement un assemblage de plusieurs éléments qui peuvent être des piles, des accumulateurs, couplés pour obtenir une tension supérieure ou une plus grande réserve d'énergie. Communément, on désigne une batterie d'accumulateurs par « batterie ». On peut aussi distinguer piles et accumulateurs/batteries par leurs domaines d'utilisation : les piles étant adaptées aux usages domestiques de faible puissance, les batteries, beaucoup plus lourdes, pour des emplois exigeant des puissances élevées et pouvant être renouvelés.

Charge et décharge d'un accumulateur

Lors de la décharge d'un accumulateur, la réaction chimique est spontanée, elle engendre le déplacement des électrons au travers du récepteur, créant ainsi le courant. L'énergie chimique est transformée en énergie électrique. Lorsque les deux électrodes possèdent le même potentiel, l'accumulateur ne délivre plus de courant : il est entièrement déchargé.

Lors de la charge d'un accumulateur, le système électrochimique est alors alimenté par un générateur de courant extérieur, placé aux bornes de l'accumulateur, qui délivre un courant dont le sens est opposé au courant débité spontanément par le système. Le système subit une réaction électrochimique forcée. La différence de potentiel électrique aux bornes des pôles de l'accumulateur est imposée. L'énergie électrique est alors convertie en énergie chimique par le biais de ce processus nommé électrolyse. Les transformations chimiques aux électrodes d'un accumulateur sont dites réversibles.

Caractéristiques d'un accumulateur

Un accumulateur peut être caractérisé par :

- sa **tension nominale**, exprimée en volt (V).

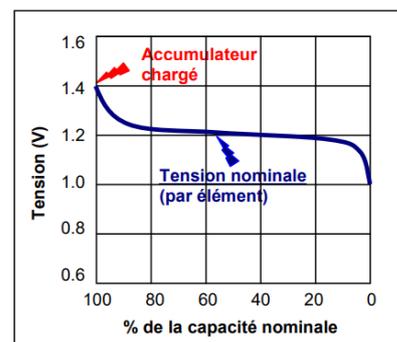
Il s'agit de la tension moyenne aux bornes de l'accumulateur ou de la batterie d'accumulateur, observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge. Elle dépend du potentiel d'oxydoréduction des couples redox utilisés et est de l'ordre de quelques volts pour un élément. L'association des éléments en batterie permet d'augmenter la tension délivrée.

sa **capacité nominale**, exprimée usuellement en ampèreheure (Ah).

Il s'agit de la quantité d'électricité que peut restituer l'accumulateur. Elle se calcule par la relation $Q = I \times \Delta t$ où I est l'intensité du courant circulant dans l'accumulateur en ampère (A) et Δt la durée de décharge en seconde (s). La capacité électrique Q s'exprime dans le système international en coulomb (C) et correspond à une charge transportée en une seconde par un courant électrique ayant une intensité d'un ampère.

Ainsi $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ ou encore $1 \text{ C} = 1/3600 \text{ Ah} = 0.278 \text{ mAh}$.

Il ne faut pas confondre **la capacité effective**, qui varie selon les conditions réelles d'utilisation et de vieillissement du système de stockage, et **la capacité nominale** dont la valeur est fournie par le fabricant dans des conditions déterminées avec un système en parfait état correspondant ainsi à la capacité maximale du dispositif dans ces conditions.



Tension nominale d'un accumulateur type Ni-Cd

Les facteurs qui influencent la durée de vie d'un accumulateur et diminuent sa capacité sont principalement : la température de fonctionnement, le nombre de cycles charge/décharge, la décharge en dessous de la valeur de tension autorisée, la surcharge de la batterie et la décharge avec des courants excessifs.

- Son **énergie** stockée : l'énergie stockée par un accumulateur se mesure dans le système international d'unité en joule.

L'unité usuelle est quant à elle le wattheure (Wh). La valeur nominale de l'énergie stockée se déduit de la capacité nominale en utilisant les relations permettant de calculer l'énergie, la puissance et la capacité :

de $E = P \times t$, $P = U \times I$ et $I = \frac{Q}{t}$ on déduit : $E = U \times Q$

Cette relation rappelle notamment la valeur de l'énergie potentielle électrostatique E d'une charge Q baignant dans un potentiel électrique, égale à ce potentiel multiplié par la charge électrique. Le potentiel U est ici la tension générée aux bornes de l'accumulateur.

Exemple : calcul de l'énergie stockée par un accumulateur délivrant une tension de 12 V, d'une capacité nominale de 20 Ah :

$$E = U \times Q = 12 \times 20 = 240 \text{ Wh}$$

- Son **temps de charge/décharge**

Il s'agit du rapport de la capacité nominale Q de l'accumulateur par le courant de charge ou décharge I de l'accumulateur. Ainsi le temps de charge ou de décharge Δt se calcule par la relation :

$$\Delta t = Q / I$$

Exemple : calcul de la durée de charge d'un accumulateur délivrant une tension de 12 V, d'une capacité nominale de 20 Ah soumis à un courant de charge de 5 A :

$$\Delta t = Q / I = 20 / 5 = 4 \text{ h}$$

- Sa **densité énergétique** exprimée usuellement en Wh/kg ou en Wh/L.

Elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (densité énergétique massique) ou par unité de volume (densité énergétique volumique).

Pour stocker une même énergie, plus le système est léger, plus la densité énergétique massique est élevée ; de même, plus le système est petit, plus la densité énergétique volumique est élevée (voir 2.4 Exemples d'accumulateurs).

Exemple : calcul de l'énergie massique D d'un accumulateur délivrant une tension de 1,2 V, de capacité 1 500 mAh et de masse 25 g :

$$E = U \times Q = 1,2 \times 1,5 = 1,8 \text{ Wh}$$

Soit une densité énergétique massique : $D = \frac{1,8}{0,025} = 72 \text{ Wh/kg}$

- Son **nombre de cycles** : il caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge.

Remarque

Le fait de ne pas respecter le cycle complet de décharge peut entraîner un effet mémoire qui se traduit par une diminution de la quantité d'énergie que l'accumulateur peut restituer et donc une perte de capacité. Les performances de l'accumulateur peuvent ainsi être altérées.

Exemples d'accumulateurs

Dans la vie courante et le secteur industriel, on peut trouver différents types d'accumulateurs. En voici quelques exemples :

Type d'accumulateur	Abréviation du dispositif	Domaine d'application	Date de commercialisation (approximative)	Tension d'un élément (en V)	Énergie massique (en Wh/kg)	Nombre de cycle maximum
plomb-dioxyde de plomb	Pb-PbO ₂	industrie automobile, alimentations de secours	fin du XIX ^e siècle	2,1	entre 15 et 40	800
nickel-fer	Ni-Fe ou NiFe	transports ferroviaires, sous-marins	1908	1,2	30	4 000
nickel-hydrure métallique	NiMH	appareils électriques et électroniques, véhicules électriques et hybrides.	1990	1,2	jusqu'à 100	1 200
lithium-ion	Li-ion	électronique portable, véhicule électrique, spatiale	technologie aboutie en 1991	3 à 3,6	jusqu'à 200	1 200
lithium-polymère	Li-Po ou LiPo	électronique portable, modélisme, automobile	2000	3,7	120	300
lithium-fer-phosphate	LFP	robotique	2007	3,3	200	3 000

Densité énergétique de différents types d'accumulateurs

