PHYSIQUE-CHIMIE

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

Terminale Bac Pro ERA-MA | Groupement 3 | Physique – Électricité

Objectifs du chapitre

- Comprendre le fonctionnement d'une pile et d'un accumulateur
- Identifier les réactions d'oxydoréduction aux électrodes
- Calculer l'énergie stockée dans un accumulateur
- Comparer les performances de différents accumulateurs

1. Introduction – Les batteries sur le chantier

CONTEXTE PROFESSIONNEL

Sur un chantier de bâtiment, de menuiserie ou de métallerie, les outils sans fil sont indispensables : perceuses visseuses, scies sabre, cloueurs, clés à chocs, meuleuses… Tous fonctionnent grâce à des **accumulateurs** (batteries rechargeables).

Une batterie Li-ion 18 V – 5 Ah est aujourd'hui standard. Mais que signifient ces chiffres ? Combien de temps peut-on travailler avant de devoir recharger ? Quelle technologie choisir pour maximiser l'autonomie ? Ce chapitre répond à toutes ces questions.

Un **système électrochimique** permet de stocker l'énergie sous forme chimique et de la restituer sous forme électrique. Il existe deux grandes catégories :

- **La pile** : source d'énergie non rechargeable (réaction chimique irréversible)
- **L'accumulateur** : source d'énergie rechargeable (réaction chimique réversible)

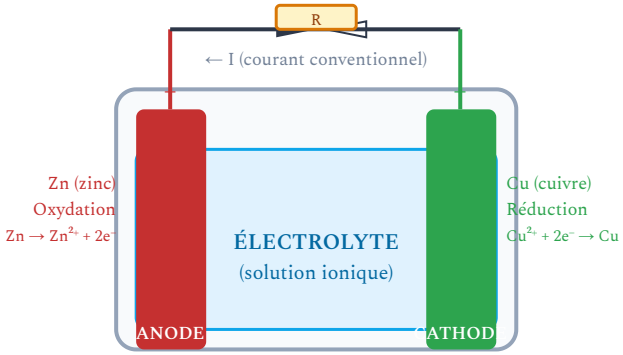
2. La pile électrochimique

DÉFINITION – PILE

Une pile est un générateur qui transforme de l'**énergie chimique en énergie électrique** par une réaction d'oxydoréduction spontanée.
Elle n'est pas rechargeable : une fois les réactifs consommés, elle est épuisée.

Une pile est composée de deux électrodes plongées dans un électrolyte :

- **L'anode (électrode négative)** : siège de l'**oxydation** → un métal perd des électrons
- **La cathode (électrode positive)** : siège de la **réduction** → les ions gagnent des électrons



Force électromotrice : E (en volts)

RÉACTIONS D'OXYDORÉDUCTION

Oxydation (anode –) : espèce chimique qui perd des électrons → réducteur
Exemple : $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$

Réduction (cathode +) : espèce chimique qui gagne des électrons → oxydant
Exemple : $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$

Les électrons circulent dans le circuit extérieur de l'anode vers la cathode (sens de l'anode vers la cathode).
Le courant conventionnel circule en sens inverse (de + vers –).

APPLICATION

Dans une pile zinc-cuivre, identifiez l'anode et la cathode, et précisez quelle réaction (oxydation ou réduction) se produit à chaque électrode.

3. L'accumulateur rechargeable

DÉFINITION – ACCUMULATEUR

Un accumulateur est un système électrochimique **rechargeable**. La réaction chimique est **réversible** :

- **Décharge :** comme une pile, énergie chimique → énergie électrique
- **Charge :** l'énergie électrique est stockée en énergie chimique (réaction inverse forcée par un courant extérieur)

DÉFINITION – CAPACITÉ D'UN ACCUMULATEUR

La capacité C est la quantité de charge électrique que peut stocker un accumulateur :
$C = I \times t$
C en ampères-heures (Ah) ou milliampères-heures (mAh), I en ampères (A), t en heures (h)

Exemple : une batterie de capacité 5 Ah peut fournir 5 A pendant 1 heure, ou 1 A pendant 5 heures.

$$E_{stockée} = U \times C = U \times I \times t$$

$E_{stockée}$ en wattheures (Wh) — U en volts (V) — C en ampères-heures (Ah)

APPLICATION

Une batterie Li-ion de visseuse affiche 18 V – 3 Ah. Calculer l'énergie stockée en Wh puis en joules.

MÉTHODE – CONVERTIR WH EN JOULES

1 Wh = 3 600 J (car 1 h = 3 600 s)

$E_{(J)} = E_{(Wh)} \times 3\,600$

MÉTHODE

Calculer l'énergie stockée et l'autonomie d'une batterie

1. Repérer les données sur la batterie : tension nominale U (en V), capacité C (en Ah) et puissance de l'outil P (en W).
2. Calculer l'énergie stockée : $E = U \times C$ (résultat en Wh).
3. Si besoin, convertir en joules : $E_{(J)} = E_{(Wh)} \times 3\,600$
4. Calculer l'autonomie : $t = \dfrac{E}{P}$ (résultat en heures si E en Wh et P en W).
5. Convertir en minutes si nécessaire : $t_{(min)} = t_{(h)} \times 60$

APPLICATION

Un poseur de cuisines utilise une scie circulaire de 18 V – 5 Ah consommant 400 W. Calculer l'autonomie de la batterie en minutes.

EXEMPLE – BATTERIE LI-ION DE CHANTIER

Batterie : 18 V – 5 Ah (perceuse Makita, Bosch, Dewalt…)

Énergie stockée :

$$E = U \times C = 18 \times 5 = \mathbf{90\ Wh}$$

En joules : $90 \times 3\,600 = 324\,000$ J $= 324$ kJ

Autonomie avec une perceuse de 200 W :

$$t = \frac{E}{P} = \frac{90\ \text{Wh}}{200\ \text{W}} = 0{,}45\ \text{h} = 27\ \text{min}$$

4. Densité d'énergie – Comparer les technologies

DÉFINITION – DENSITÉ D'ÉNERGIE MASSIQUE

La densité d'énergie massique est l'énergie stockée par kilogramme d'accumulateur :

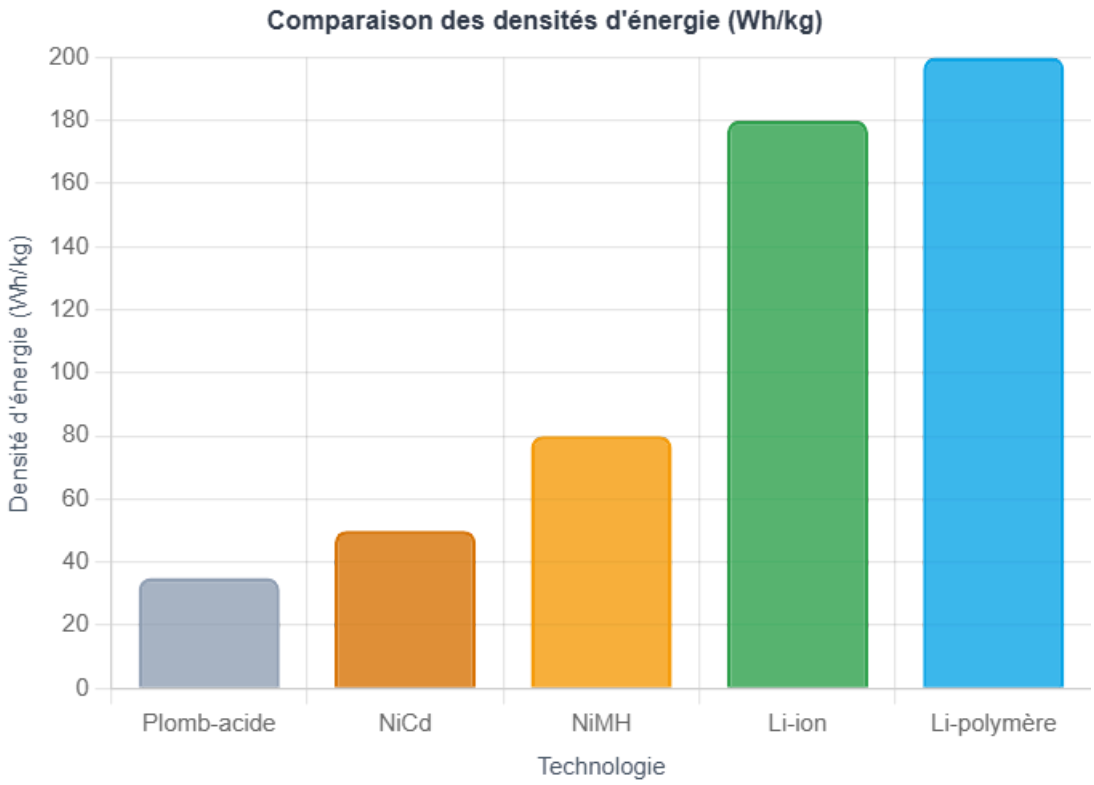
$$\text{Densité} = \frac{E_{stockée}}{m}$$

En Wh/kg — plus c'est élevé, plus la batterie est légère pour une même énergie stockée.

Les outils de chantier utilisent principalement des batteries **Li-ion** car elles offrent la meilleure densité d'énergie tout en étant rechargeables rapidement.

Technologie	Tension nominale	Densité d'énergie (Wh/kg)	Nombre de cycles	Applications professionnelles
Plomb-acide	2 V/élément	30 – 40	300 – 500	Batterie de chantier, éclairage de secours en atelier
NiCd (Nickel-Cadmium)	1,2 V/élément	45 – 60	1 000 – 2 000	Anciens outils sans fil (moins utilisés)
NiMH (Nickel-Métal Hydrure)	1,2 V/élément	60 – 100	500 – 1 000	Outils sans fil milieu de gamme
Li-ion (Lithium-ion)	**3,6 V/élément**	**150 – 200**	**500 – 1 500**	**Outils professionnels de chantier**
Li-polymère	3,7 V/élément	180 – 220	300 – 500	Drones de surveillance, robots de manutention légers

5. Graphique – Densité d'énergie par technologie

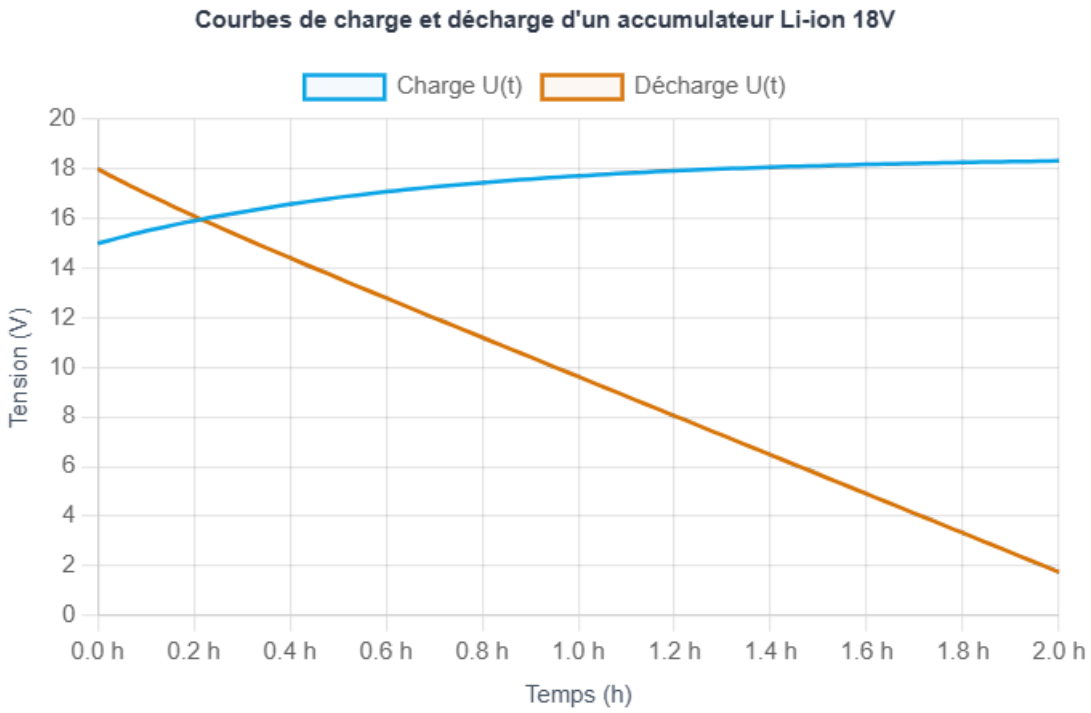


6. Animation – Simulation de charge et décharge

Simulation d'un accumulateur 18 V – 4 Ah. Observez le niveau de charge évoluer.

Cliquez sur "Charger" ou "Décharger" pour simuler l'accumulateur.

7. Courbes de charge et décharge



8. Exemples numériques expliqués

EXEMPLE 1 – ÉNERGIE D'UNE BATTERIE DE PERCEUSE

Données : batterie Li-ion, U = 18 V, C = 4 Ah

Calcul de l'énergie stockée :

$$E = U \times C = 18 \times 4 = \mathbf{72\ Wh}$$

$$E_{(J)} = 72 \times 3\,600 = 259\,200\ \text{J} \approx 259\ \text{kJ}$$

EXEMPLE 2 – AUTONOMIE D'UNE PERCEUSE

Données : batterie 72 Wh, perceuse consommant P = 200 W

Calcul de l'autonomie :

$$t = \frac{E}{P} = \frac{72\ \text{Wh}}{200\ \text{W}} = 0{,}36\ \text{h}$$

$$t = 0{,}36 \times 60 = \mathbf{21{,}6\ min}$$

Conclusion : La perceuse peut fonctionner environ 21 minutes avant que la batterie soit vide.

EXEMPLE 3 – TEMPS DE CHARGE

Données : accumulateur de capacité C = 4 Ah, chargeur délivrant I = 2 A

$$t = \frac{C}{I} = \frac{4\ \text{Ah}}{2\ \text{A}} = \mathbf{2\ h}$$

Un chargeur rapide de 4 A réduit ce temps à 1 heure.

9. Application aux métiers de l'agencement et de la menuiserie

OUTILLAGE SANS FIL SUR CHANTIER

Sur un chantier d'agencement, un compagnon utilise plusieurs outils :

- **Visseuse à percussion 18V – 5Ah :** E = 18 × 5 = 90 Wh
- **Scie circulaire 18V – 6Ah :** E = 18 × 6 = 108 Wh
- **Clé à chocs 18V – 4Ah :** E = 18 × 4 = 72 Wh

Pour ne pas être en panne sur le chantier, il est conseillé d'avoir **2 batteries par outil** : pendant qu'une est en charge, l'autre est utilisée.

ENGINS DE MANUTENTION ÉLECTRIQUES EN ATELIER

Les engins de manutention (chariots élévateurs, transtockeurs) utilisent de grandes batteries :

- Batterie 48 V – 200 Ah → E = 48 × 200 = **9 600 Wh = 9,6 kWh**
- Une telle batterie peut alimenter un engin de 2 000 W pendant 9 600/2 000 = **4,8 h**

10. À retenir

Formules clés du chapitre :

- Capacité : $C = I \times t$ (Ah = A × h)
- Énergie stockée : $E = U \times C = U \times I \times t$ (Wh)
- Autonomie : $t = \dfrac{E}{P}$ (heures, si E en Wh et P en W)
- Conversion : 1 Wh = 3 600 J

À savoir expliquer :

- Pile = source non rechargeable (réaction irréversible)
- Accumulateur = source rechargeable (réaction réversible)
- Anode (–) : oxydation (perd des électrons)
- Cathode (+) : réduction (gagne des électrons)
- Li-ion = meilleure densité d'énergie → privilégié pour les outils de chantier

ATTENTION AUX ERREURS FRÉQUENTES

- La capacité C s'exprime en **Ah** (ampères-heures), pas en A (ampères).
- Pour calculer l'énergie en Wh : E = U × C (et non E = P × t sans tenir compte de U).
- Ne pas confondre **pile** (non rechargeable) et **accumulateur** (rechargeable).
- L'oxydation se passe à l'**anode** (–), la réduction à la **cathode** (+).
- Les électrons circulent de l'anode vers la cathode dans le circuit extérieur (sens contraire au courant conventionnel).

11. Erreurs fréquentes

✗ Confondre capacité et intensité

La capacité C s'exprime en ampères-heures (Ah), pas en ampères (A). Une batterie de 5 Ah peut fournir 5 A pendant 1 heure, ou 1 A pendant 5 heures.

Conseil : toujours préciser l'unité Ah pour une capacité, A pour une intensité.

✗ Calculer l'énergie sans la tension

L'énergie se calcule avec E = U × C (en Wh). Utiliser seulement P × t sans tenir compte de la tension U est une erreur fréquente.

Conseil : relire les unités — si C est en Ah et U en V, alors E = U × C est en Wh.

✗ Inverser anode et cathode

L'oxydation se produit à l'anode (électrode négative –), la réduction à la cathode (électrode positive +). Inverser ces deux termes est une erreur classique.

Conseil : retenir "Anode = Oxydation" → les deux commencent par des voyelles.

✗ Confondre pile et accumulateur

Une pile est non rechargeable (réaction irréversible) ; un accumulateur est rechargeable (réaction réversible). Sur un chantier, on utilise des accumulateurs Li-ion, pas des piles.

Conseil : penser aux batteries d'outils électroportatifs → ce sont toujours des accumulateurs.

Simulation interactive

Pile électrochimique

PHYSIQUE-CHIMIE

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

Exercices | Terminale Bac Pro ERA-MA – Groupement 3

Socle | Standard | Approfondissement | Tout voir

🎯 Objectifs du chapitre — cliquer pour développer

Rappels du cours

Pile vs accumulateur : une pile est un générateur électrochimique à usage unique (réaction irréversible). Un accumulateur est rechargeable (réaction réversible).

Constituants d'une cellule électrochimique :

- **Anode** (pôle −) : siège de l'*oxydation* (perte d'électrons)
- **Cathode** (pôle +) : siège de la *réduction* (gain d'électrons)
- **Électrolyte** : permet la circulation des ions entre anode et cathode

Formules essentielles :

- **Énergie stockée** : $E = U \cdot I \cdot t$ (joules) ou $E = U \cdot Q$ avec Q en Ah → $E\ (\text{Wh}) = U\ (\text{V}) \times Q\ (\text{Ah})$
- **Conversion** : $1\ \text{Wh} = 3\,600\ \text{J}$
- **Autonomie** : $t = \dfrac{E\ (\text{Wh})}{P\ (\text{W})}$ (en heures)
- **Densité d'énergie massique** : $d = \dfrac{E\ (\text{Wh})}{m\ (\text{kg})}$ (Wh/kg)
- **Capacité en courant** : $Q\ (\text{Ah}) = I\ (\text{A}) \times t\ (\text{h})$

Attention ! La capacité s'exprime en **Ah (ampères-heures)** et représente une quantité de charge. L'énergie s'exprime en **Wh (watts-heures)** et tient compte de la tension. On ne peut pas comparer directement Ah et Wh sans connaître la tension ! Une batterie 12 V 60 Ah n'a pas la même énergie qu'une batterie 24 V 60 Ah.

Schéma d'une pile électrochimique

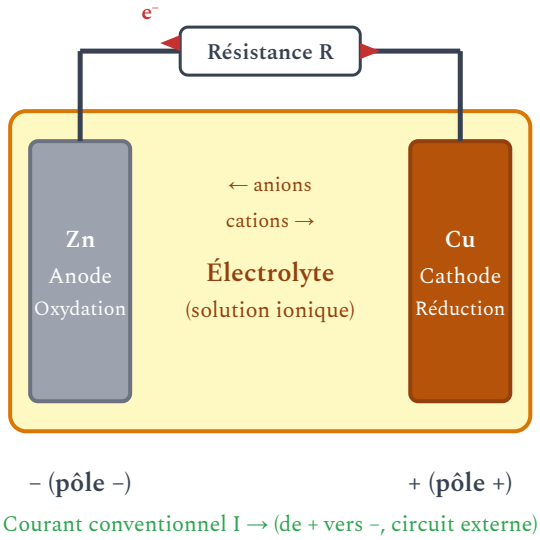
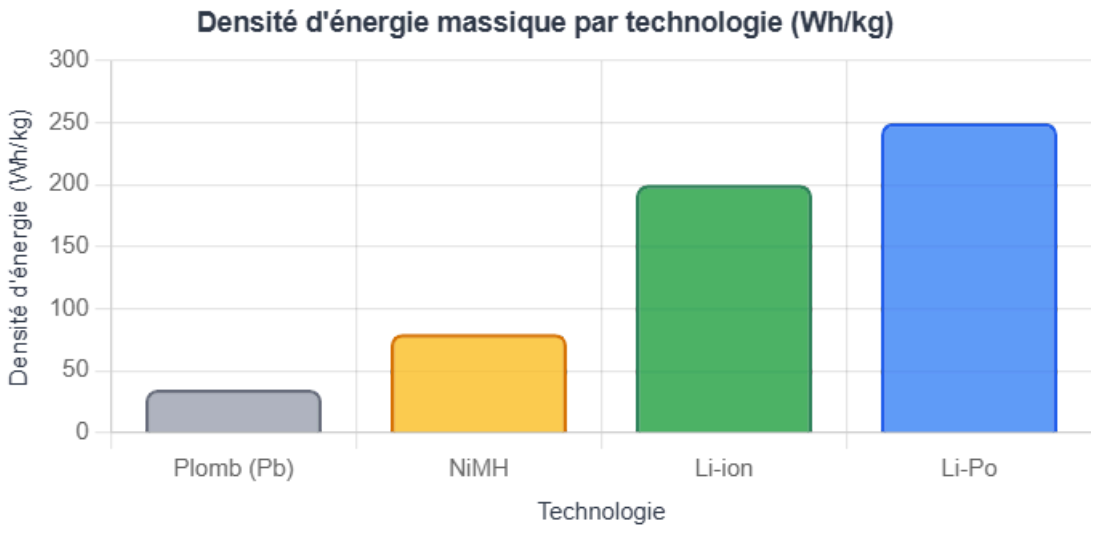


Figure 1 – Schéma de principe d'une pile Daniell (Zn/Cu). Les électrons circulent dans le circuit externe de l'anode vers la cathode.

Comparaison des densités d'énergie par technologie

Méthode :

La densité d'énergie massique (Wh/kg) indique combien d'énergie on peut stocker par kilogramme de batterie. Plus elle est élevée, plus la batterie est légère pour une même autonomie. C'est un critère décisif pour les applications mobiles (outils sans fil, robots de chantier, chariots élévateurs électriques).



Exercices guidés pas à pas

EXERCICE 1 Identifier les composants d'une pile SOCLE

On observe le schéma de la pile Daniell ci-dessus. Compléter les phrases suivantes :

1. L'électrode en zinc (Zn) est le pôle _____ (+ ou –) de la pile. On l'appelle l'_____ .

2. À cette électrode se produit une réaction d'_____ (oxydation ou réduction) : le métal _____ des électrons.

3. L'électrode en cuivre (Cu) est le pôle _____ de la pile. On l'appelle la _____ .

4. Les électrons circulent dans le circuit externe de l'_____ vers la _____ (de – vers +).

5. L'électrolyte sert à permettre la circulation des _____ entre les deux électrodes.

Mes calculs :

EXERCICE 2 **Calculer l'énergie d'une batterie – pas à pas** SOCLE

Une batterie d'atelier a les caractéristiques suivantes : tension $U = 12$ V, capacité $Q = 60$ Ah.

> **Méthode :**
>
> On utilise la formule $E\,(\text{Wh}) = U\,(\text{V}) \times Q\,(\text{Ah})$

Étape 1 : Recopier la formule de l'énergie :

$E =$_____ $\times$ _____

Étape 2 : Remplacer par les valeurs numériques :

$E =$_____ $\times$ _____ $=$ _____ Wh

Étape 3 : Convertir en joules. On sait que 1 Wh $= 3\,600$ J.

$E =$_____ $\times 3\,600 =$_____ J

Étape 4 : L'éclairage de secours consomme $P = 60$ W. Calculer l'autonomie :

$t = \dfrac{E}{P} = \dfrac{\text{_____}}{\text{_____}} =$_____ h

Mes calculs :

EXERCICE 3 Comparer deux batteries – tableau guidé SOCLE

On compare deux batteries pour un outil sans fil. Compléter le tableau :

Caractéristique	Batterie A (Plomb)	Batterie B (Li-ion)
Tension U	12 V	18 V
Capacité Q	10 Ah	4 Ah
Énergie $E = U \times Q$	_____ Wh	_____ Wh
Masse m	3,5 kg	0,4 kg
Densité $d = E/m$	_____ Wh/kg	_____ Wh/kg

1. Calculer l'énergie stockée dans chaque batterie et compléter la ligne « Énergie ».

2. Calculer la densité d'énergie massique de chaque batterie et compléter la dernière ligne.

3. Quelle batterie est la plus légère pour la même énergie ? Laquelle choisir pour un outil portatif ?

Mes calculs :

EXERCICE 4 Pile ou accumulateur ? – Classer des objets du quotidien SOCLE

Pour chaque objet ci-dessous, indiquer s'il fonctionne avec une **pile** (non rechargeable) ou un **accumulateur** (rechargeable). Justifier en une phrase.

1. Une télécommande de télévision (piles AAA).
2. Une visseuse sans fil de chantier (batterie Li-ion 18 V).
3. Un détecteur de fumée (pile lithium 9 V).
4. Un téléphone portable.
5. Une lampe frontale rechargeable par USB.

Mes calculs :

EXERCICE 5 Lire les caractéristiques d'une batterie SOCLE

Sur une batterie d'outil sans fil, on lit les indications suivantes : **18 V – 4 Ah – Li-ion**.

1. Que signifie « 18 V » ? Entourer la bonne réponse :

a) La puissance de la batterie b) La tension nominale de la batterie c) L'énergie stockée dans la batterie

2. Que signifie « 4 Ah » ? Entourer la bonne réponse :

a) La capacité de la batterie b) La durée de vie de la batterie c) Le courant maximal

3. Que signifie « Li-ion » ? Entourer la bonne réponse :

a) Le fabricant b) La technologie chimique de l'accumulateur c) Le type de chargeur

4. Calculer l'énergie stockée dans cette batterie. On donne : $E = U \times Q$.

$E =$ _____ $\times$ _____ $=$ _____ Wh

Mes calculs :

EXERCICE 6 **Calculer une autonomie – pas à pas** SOCLE

Un menuisier utilise une ponceuse sans fil dont la batterie stocke une énergie $E = 90$ Wh. La ponceuse consomme une puissance $P = 180$ W.

> **Méthode :**
>
> On utilise la formule $t = \dfrac{E}{P}$ pour obtenir l'autonomie en heures.

Étape 1 : Recopier la formule de l'autonomie :

$t =$ $\dfrac{\quad\quad}{\quad\quad}$

Étape 2 : Remplacer par les valeurs numériques :

$t =$ $\dfrac{\quad\quad}{\quad\quad}$ $=$ _____ h

Étape 3 : Convertir en minutes :

$t =$ _____ $\times 60 =$ _____ min

Étape 4 : Le menuisier travaille par sessions de 10 minutes. Combien de sessions peut-il réaliser ?

Mes calculs :

EXERCICE 7 **Convertir des Wh en joules – exercice guidé** SOCLE

On rappelle que $1\ \text{Wh} = 3\,600\ \text{J}$.

Compléter les conversions suivantes en suivant le modèle :

Modèle : $10\ \text{Wh} = 10 \times 3\,600 = 36\,000\ \text{J}$

1. $50\ \text{Wh} = 50 \times 3\,600 =$ _____ J
2. $72\ \text{Wh} = 72 \times$ _____ = _____ J
3. $90\ \text{Wh} =$ _____ × _____ = _____ J
4. $200\ \text{Wh} =$ _____ J. Exprimer aussi en kJ (diviser par 1 000).
5. Une batterie stocke $324\,000$ J. Convertir en Wh : $E = \dfrac{324\,000}{3\,600} =$ _____ Wh

Mes calculs :

EXERCICE 8 **Temps de charge d'une batterie – calcul guidé** SOCLE

Un artisan menuisier recharge la batterie de sa scie sauteuse sans fil. La batterie a une capacité $Q = 5$ Ah. Le chargeur délivre un courant $I = 2{,}5$ A.

> **Méthode :**
>
> On utilise $Q = I \times t$, donc $t = \dfrac{Q}{I}$.

Étape 1 : Recopier la formule du temps de charge :

$t =$ _____ / _____

Étape 2 : Remplacer par les valeurs :

$t =$ _____ / _____ $=$ _____ h

Étape 3 : Convertir en heures et minutes.

Étape 4 : Un chargeur rapide délivre $I = 5$ A. Calculer le nouveau temps de charge. Que constatez-vous ?

Mes calculs :

Courbe de décharge d'un accumulateur

> **Méthode :**
>
> Lors de la décharge d'un accumulateur, la tension U reste relativement stable (palier) puis chute brusquement en fin de décharge. Cette chute signale que la batterie est vide. Repérer le palier et la chute finale sur la courbe ci-dessous.

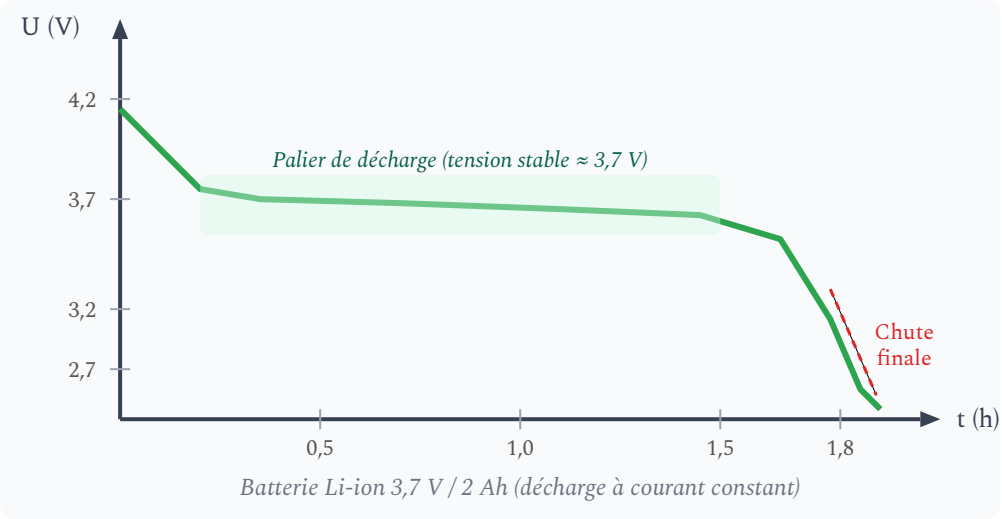


Figure 2 — Courbe de décharge d'un accumulateur Li-ion : la tension reste stable pendant le palier puis chute brusquement

Exercices de base

EXERCICE 9 Anode et cathode dans une pile STANDARD

On étudie une pile dont les électrodes sont en zinc (Zn) et en cuivre (Cu) plongées dans un électrolyte.

1. Définir ce qu'est l'anode dans une pile électrochimique.
2. Définir ce qu'est la cathode.
3. Dans une pile Zn/Cu, quelle électrode est l'anode ? Quelle est la cathode ?
4. Dans quel sens circulent les électrons dans le circuit extérieur ?

Mes calculs :

EXERCICE 10 **Énergie stockée dans une batterie** STANDARD

Une batterie d'alimentation de secours pour un atelier est caractérisée par : tension $U = 12$ V, capacité $Q = 60$ Ah.

1. Rappeler la formule de l'énergie en Wh à partir de U et Q.

2. Calculer l'énergie stockée en Wh.

3. Convertir cette énergie en joules (1 Wh $= 3\,600$ J).

4. Si l'éclairage de secours de l'atelier consomme un courant de 5 A, combien de temps (en heures puis en minutes) peut-il fonctionner avant de décharger complètement la batterie ?

Mes calculs :

EXERCICE 11 **Durée de décharge** STANDARD

Une batterie de secours contient une énergie de $E = 100$ Wh. Elle alimente un équipement de surveillance consommant $P = 20$ W.

1. Écrire la formule de l'autonomie t en fonction de E et P.
2. Calculer l'autonomie en heures.
3. Exprimer cette autonomie en heures et minutes.
4. Si l'équipement consomme 40 W au lieu de 20 W, quelle est la nouvelle autonomie ?

Mes calculs :

Exercices guidés

EXERCICE 12 Outil sans fil – énergie et autonomie STANDARD

Une visseuse sans fil porte les indications suivantes sur son accu : **18 V – 2 Ah**. Son moteur consomme une puissance de **36 W** lors d'une utilisation normale.

> **Méthode :**
> Calculer d'abord l'énergie en Wh à partir de la tension et de la capacité, puis diviser par la puissance pour obtenir l'autonomie théorique.

1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie en Wh.

2. Calculer l'autonomie théorique en utilisation continue.

3. Le courant de décharge correspond-il bien à 2 A ? Vérifier par le calcul ($I = P/U$).

4. En réalité, l'autonomie est inférieure à la valeur théorique. Citer deux raisons expliquant cela.

Mes calculs :

EXERCICE 13 **Densité d'énergie d'un accumulateur Li-ion** STANDARD

Un accumulateur Li-ion de robot industriel a les caractéristiques suivantes : énergie $E = 200$ Wh, masse $m = 1{,}2$ kg.

1. Écrire la formule de la densité d'énergie massique d.

2. Calculer la densité d'énergie de cet accumulateur (en Wh/kg).

3. Comparer avec une batterie au plomb de même masse dont la densité d'énergie est 35 Wh/kg. Quelle énergie stockerait-elle ?

4. En déduire l'intérêt du Li-ion pour les robots mobiles.

Mes calculs :

Exercices d'application

EXERCICE 14 Comparaison de technologies de batteries STANDARD

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de trois technologies d'accumulateurs :

Technologie	Densité énergie (Wh/kg)	Coût relatif	Nb cycles (charge/décharge)	Risques
Plomb (Pb)	30 – 50	Faible	300 – 500	Acide, lourd
NiMH	60 – 120	Moyen	500 – 1 000	Effet mémoire
Li-ion	150 – 250	Élevé	500 – 1 500	Thermique si endommagé

1. Quelle technologie offre la meilleure densité d'énergie ?

2. Quelle technologie choisir pour une application nécessitant un faible coût initial et une puissance modérée (ex : balise de signalisation) ?

3. Pour un outil portatif de maintenance (contrainte : masse minimale), quelle technologie est la plus adaptée ? Justifier.

4. Quel est l'inconvénient principal du Li-ion en termes de sécurité ?

Mes calculs :

EXERCICE 15 **Dimensionnement batterie d'un robot autonome** STANDARD

Un robot de maintenance autonome doit pouvoir fonctionner pendant **8 heures** sans recharge. Sa consommation moyenne est de **150 W** (motorisation + électronique). On envisage une solution Li-ion (densité 180 Wh/kg) avec un coefficient de sécurité de 1,2 (on surdimensionne de 20 % pour tenir compte du vieillissement).

1. Calculer l'énergie nécessaire pour 8 heures de fonctionnement.

2. En appliquant le coefficient de sécurité, calculer l'énergie de la batterie à prévoir.

3. Calculer la masse minimale de la batterie Li-ion.

4. La batterie est en 48 V. Calculer la capacité nécessaire en Ah.

5. Comparer avec une solution Plomb (densité 40 Wh/kg) : quelle masse de batterie faudrait-il ?

Mes calculs :

EXERCICE 16 Batterie de scie circulaire sans fil STANDARD

Un menuisier agenceur utilise une scie circulaire sans fil équipée d'une batterie **18 V – 6 Ah**. La scie consomme une puissance de **540 W** en fonctionnement.

1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie en Wh.

2. Calculer l'autonomie de la scie en fonctionnement continu (en heures puis en minutes).

3. Le menuisier estime qu'il utilise la scie en continu pendant 2 minutes par coupe, et réalise 8 coupes par heure. Combien d'heures de travail peut-il effectuer avant de recharger ?

4. Convertir l'énergie stockée en joules.

Mes calculs :

EXERCICE 17 Choix de batterie pour une défonceuse STANDARD

Un installateur d'agencement doit choisir entre deux batteries pour sa défonceuse sans fil :

Caractéristique	Batterie X	Batterie Y
Tension	18 V	18 V
Capacité	4 Ah	8 Ah
Masse	0,62 kg	1,15 kg
Prix	55 €	95 €

La défonceuse consomme $P = 360$ W.

1. Calculer l'énergie stockée dans chaque batterie.
2. Calculer l'autonomie (en minutes) pour chaque batterie.
3. Calculer la densité d'énergie massique de chaque batterie.
4. Calculer le prix par Wh pour chaque batterie. Laquelle est la plus économique ?

Mes calculs :

EXERCICE 18 **Courant de décharge et intensité** STANDARD

Un aspirateur d'atelier sans fil fonctionne avec une batterie **36 V – 4 Ah**. Sa puissance en fonctionnement est de $P = 252$ W.

1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie (en Wh).

2. Calculer le courant de décharge I consommé par l'aspirateur. On rappelle que $P = U \times I$.

3. Calculer l'autonomie de deux façons différentes :

a) En utilisant $t = \dfrac{E}{P}$

b) En utilisant $t = \dfrac{Q}{I}$

4. Vérifier que les deux résultats sont identiques. Expliquer pourquoi.

Mes calculs :

EXERCICE 19 **Nombre de cellules dans un pack batterie** STANDARD

Une batterie d'outil professionnel est constituée de cellules Li-ion élémentaires. Chaque cellule a une tension nominale de **3,6 V** et une capacité de **3 Ah**.

1. La batterie affiche une tension nominale de 18 V. Combien de cellules sont associées **en série** ?

2. Calculer l'énergie stockée dans une cellule élémentaire (en Wh).

3. Calculer l'énergie totale de la batterie 18 V constituée de ces cellules en série.

4. Pour augmenter la capacité à 6 Ah, on associe des cellules **en parallèle**. Combien de cellules en parallèle faut-il par étage ?

5. Combien de cellules au total contient cette batterie 18 V – 6 Ah ?

Mes calculs :

EXERCICE 20 **Vieillissement d'une batterie** STANDARD

La batterie Li-ion d'une cloueuse sans fil avait une capacité initiale de $Q_0 = 5$ Ah à l'achat. Après 800 cycles de charge/décharge, sa capacité n'est plus que de $Q = 4$ Ah. La tension nominale reste $U = 18$ V.

1. Calculer l'énergie initiale E_0 et l'énergie actuelle E de la batterie (en Wh).

2. Calculer le pourcentage de capacité perdue.

3. La cloueuse consomme $P = 300$ W. Calculer l'autonomie initiale et l'autonomie actuelle (en minutes).

4. De combien de minutes l'autonomie a-t-elle diminué ?

Mes calculs :

EXERCICE 21 **Gestion d'un parc de batteries en atelier** STANDARD

Un atelier de menuiserie dispose de 6 batteries identiques **18 V – 5 Ah** pour alimenter l'ensemble des outils sans fil. Chaque batterie se recharge en 1 heure sur un chargeur rapide délivrant un courant de 5 A.

1. Vérifier par le calcul que le temps de charge est bien de 1 heure avec un chargeur de 5 A.

2. Calculer l'énergie totale disponible dans le parc de 6 batteries (en Wh).

3. Un compagnon utilise en moyenne 3 batteries par demi-journée (4 heures de travail). Quelle énergie consomme-t-il par demi-journée ?

4. En déduire la puissance moyenne consommée par les outils (en W).

5. L'atelier a 2 chargeurs. Peut-il assurer la rotation des 6 batteries pour 2 compagnons travaillant simultanément ? Justifier.

Mes calculs :

Exercices contextualisés – Énergie et outillage

EXERCICE 22 Chariot élévateur électrique de maintenance

APPROFONDISSEMENT

Dans un atelier industriel, un menuisier agenceur est chargé de gérer la recharge du parc de chariots élévateurs électriques. Chaque chariot est équipé d'une batterie traction : **48 V – 500 Ah**. Le coût de l'électricité est de **0,15 €/kWh**. Le rendement du chargeur est de **85 %**.

1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie du chariot (en Wh puis en kWh).

2. Calculer l'énergie que le chargeur doit fournir au réseau pour recharger complètement la batterie (tenir compte du rendement du chargeur).

3. Calculer le coût d'une recharge complète.

4. L'atelier possède 5 chariots. Calculer le coût mensuel des recharges si chaque chariot est rechargé en moyenne 20 fois par mois.

Mes calculs :

EXERCICE 23 **Engin de chantier hybride : batterie Li-ion vs diesel**

APPROFONDISSEMENT

Un bureau d'étude compare deux solutions d'alimentation pour un engin de chantier hybride devant travailler **8 heures par jour** avec une puissance moyenne de **20 kW**.

- **Solution A – Batterie Li-ion :** densité 200 Wh/kg, coût 300 €/kWh
- **Solution B – Moteur diesel :** 1 litre de gazole ≈ 10 kWh d'énergie thermique, rendement du moteur diesel 35 %, prix du gazole 1,80 €/L

1. Calculer l'énergie mécanique nécessaire pour une journée de travail (8 h à 20 kW).

2. Solution A : Calculer la masse de la batterie Li-ion (rendement batterie 90 %).

3. Solution A : Calculer le coût d'investissement de la batterie.

4. Solution B : Calculer le volume de gazole consommé par jour (tenir compte du rendement).

5. Solution B : Calculer le coût quotidien en carburant.

6. En supposant que la batterie Li-ion dure 5 ans (1 500 cycles) et que l'engin travaille 250 jours/an, calculer le coût énergétique journalier de la solution A (amortissement batterie uniquement, énergie de recharge ≈ 0,15 €/kWh). Comparer avec le diesel.

Mes calculs :

EXERCICE 24

Dimensionnement d'un système de stockage photovoltaïque pour atelier

APPROFONDISSEMENT

Un artisan menuisier souhaite alimenter son atelier en autoconsommation photovoltaïque avec stockage. L'atelier consomme en moyenne $E_{\text{jour}} = 18$ kWh/jour. Le système PV produit $E_{\text{PV}} = 12$ kWh/jour en période hivernale. Le reste est couvert par une batterie de stockage (tension $U_B = 48$ V, profondeur de décharge maximale : 80 %).

1. Quelle énergie doit fournir la batterie chaque jour (en kWh) ?

2. En tenant compte de la profondeur de décharge, calculer la capacité utile nécessaire C_{utile} en kWh.

3. Calculer la capacité en Ah que doit avoir la batterie à 48 V.

4. Des accumulateurs lithium 48 V – 100 Ah sont disponibles. Combien d'éléments en parallèle faut-il associer ?

5. Calculer l'énergie totale stockée dans le parc de batteries. Comparer à l'énergie journalière requise et commenter.

Mes calculs :

EXERCICE 25 Comparaison de technologies de stockage — analyse multicritère

APPROFONDISSEMENT

Un chef de chantier doit choisir la technologie de batterie pour alimenter un engin de levage électrique sur un chantier d'agencement intérieur. Trois technologies sont évaluées :

Critère	Plomb-acide	NiMH	Li-ion
Tension nominale (cellule)	2 V	1,2 V	3,6 V
Densité énergie massique	35 Wh/kg	80 Wh/kg	200 Wh/kg
Nombre de cycles	300–500	500–1000	1000–3000
Prix (€/kWh stocké)	100	250	400
Autodécharge/mois	5 %	20 %	2 %

L'engin nécessite une batterie de 48 V – 150 Ah.

1. Calculer l'énergie stockée (en kWh).
2. Calculer la masse de chaque technologie pour cette capacité.
3. Calculer le coût de la batterie pour chaque technologie.
4. Calculer le coût par cycle de chaque technologie (coût / nombre de cycles moyen).
5. Quelle technologie recommanderiez-vous pour ce chantier et pourquoi ? (Justifier avec au moins 3 critères.)

Mes calculs :

EXERCICE 26 Rendement énergétique d'un cycle charge/décharge

APPROFONDISSEMENT

Un technicien d'agencement teste une batterie Li-ion **18 V – 5 Ah**. Lors de la charge complète, le chargeur consomme une énergie de $E_{\text{charge}} = 100$ Wh sur le réseau. Lors de la décharge complète, la batterie restitue une énergie utile de $E_{\text{décharge}} = 81$ Wh.

1. Calculer l'énergie théorique stockée dans la batterie ($E = U \times Q$).
2. Calculer le rendement du chargeur : $\eta_{\text{chargeur}} = \dfrac{E_{\text{théorique}}}{E_{\text{charge}}}$.
3. Calculer le rendement de décharge : $\eta_{\text{décharge}} = \dfrac{E_{\text{décharge}}}{E_{\text{théorique}}}$.
4. Calculer le rendement global du cycle (charge + décharge) : $\eta_{\text{global}} = \dfrac{E_{\text{décharge}}}{E_{\text{charge}}}$.
5. Vérifier que $\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{chargeur}} \times \eta_{\text{décharge}}$. Commenter la valeur obtenue.

Mes calculs :

EXERCICE 27 **Coût d'utilisation annuel d'un parc d'outils sans fil**

APPROFONDISSEMENT

Un atelier de fabrication de meubles dispose de 10 batteries **18 V – 5 Ah** pour l'ensemble de ses outils sans fil. Chaque batterie est rechargée en moyenne **une fois par jour**, 5 jours par semaine, 47 semaines par an. Le rendement de charge est de **88 %** et le prix de l'électricité est de **0,18 €/kWh**.

1. Calculer l'énergie stockée dans une batterie (en Wh).

2. Calculer l'énergie prélevée au réseau pour une recharge (tenir compte du rendement).

3. Calculer le nombre total de recharges par an pour l'ensemble du parc.

4. Calculer l'énergie totale consommée par an (en kWh).

5. Calculer le coût annuel en électricité pour la recharge de tout le parc.

6. Les batteries coûtent 85 € pièce et durent en moyenne 1 000 cycles. Calculer le coût annuel d'amortissement des batteries. Quel est le coût total annuel (électricité + amortissement) ?

Mes calculs :

EXERCICE 28 **Autonomie d'un véhicule utilitaire électrique de chantier**

APPROFONDISSEMENT

Une entreprise de menuiserie utilise un utilitaire électrique pour livrer des agencements sur chantier. Le véhicule est équipé d'une batterie Li-ion de **400 V – 60 Ah**. Sa consommation moyenne est de **18 kWh/100 km**.

1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie (en kWh).

2. Calculer l'autonomie théorique du véhicule (en km).

3. En hiver, la consommation augmente de 25 % à cause du chauffage. Calculer la nouvelle autonomie.

4. Le trajet aller-retour vers le chantier fait 85 km. Le véhicule peut-il faire l'aller-retour en hiver sans recharger ? Justifier.

5. Calculer le coût du trajet aller-retour (électricité à 0,18 €/kWh). Comparer avec un utilitaire diesel consommant 8 L/100 km (gazole à 1,75 €/L).

Mes calculs :

EXERCICE 29 Dimensionnement d'une batterie pour éclairage autonome de chantier

APPROFONDISSEMENT

Un chef de chantier en agencement intérieur doit installer un éclairage autonome alimenté par batterie. L'éclairage LED consomme $P = 120$ W et doit fonctionner **10 heures par jour** pendant **5 jours** sans possibilité de recharge (chantier isolé). La batterie sera en **24 V**, technologie Li-ion. On applique un coefficient de sécurité de **1,3** (marge pour le froid et le vieillissement).

1. Calculer l'énergie nécessaire pour une journée de travail.

2. Calculer l'énergie nécessaire pour les 5 jours.

3. Appliquer le coefficient de sécurité pour obtenir l'énergie de la batterie à prévoir.

4. Calculer la capacité nécessaire en Ah (batterie 24 V).

5. Calculer la masse de la batterie (densité Li-ion : 180 Wh/kg). Commenter la faisabilité du transport sur chantier.

Mes calculs :

EXERCICE 30 **Bilan carbone : batterie vs groupe électrogène** APPROFONDISSEMENT

Un artisan menuisier hésite entre deux solutions pour alimenter ses outils sur un chantier de pose de cuisine :

- **Solution A :** 4 batteries Li-ion 18 V – 5 Ah, rechargées chaque soir sur le réseau (facteur d'émission : 60 g CO_2/kWh, rendement de charge 90 %).
- **Solution B :** Un groupe électrogène essence de 2 kW, consommant 1,2 L/h d'essence (facteur d'émission : 2,3 kg CO_2/L), utilisé 4 heures/jour.

Le chantier dure **15 jours**.

1. Calculer l'énergie stockée dans les 4 batteries (en Wh). Combien de recharges par jour si les 4 batteries sont vidées chaque jour ?

2. Calculer l'énergie prélevée au réseau par jour pour la solution A (tenir compte du rendement).

3. Calculer les émissions de CO_2 de la solution A sur les 15 jours (en kg).

4. Calculer la consommation d'essence de la solution B sur les 15 jours (en litres).

5. Calculer les émissions de CO_2 de la solution B sur les 15 jours (en kg).

6. Comparer les deux solutions en termes d'émissions. Quel facteur multiplicatif sépare les deux solutions ?

Mes calculs :

À retenir – Essentiel du chapitre

- Une pile est à usage unique ; un accumulateur est rechargeable.
- L'anode est le siège de l'oxydation (pôle –) ; la cathode est le siège de la réduction (pôle +).
- Énergie stockée : $E\,(\text{Wh}) = U\,(\text{V}) \times Q\,(\text{Ah})$. Ne pas confondre Ah et Wh !
- Autonomie : $t\,(\text{h}) = E\,(\text{Wh}) / P\,(\text{W})$.
- Densité d'énergie : Li-ion (≈ 200 Wh/kg) > NiMH (≈ 80 Wh/kg) > Pb (≈ 35 Wh/kg).
- Le choix de la technologie dépend du contexte : coût, masse, cycles, sécurité.

PHYSIQUE-CHIMIE

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

ERA-MA — Groupement 3 — Terminale Bac Pro

Socle | Standard | Approfondissement | Tout voir

🎯 Objectifs du chapitre — cliquer pour développer

Durée : 1 heure **Barème :** /20 points **Documents :** Calculatrice autorisée — aucun document

Nom : _____

APP – S'Approprier | ANA – Analyser/Raisonner | REA – Réaliser | VAL – Valider | COM – Communiquer

Exercice	Questions	Compétences	Points
Exercice 1 — Batterie plomb-acide du chariot	Q1 à Q4	APP, ANA, REA, VAL	10 pts
Exercice 2 — Comparaison Li-ion vs Pb-acide	Q1 à Q5	APP, ANA, REA, VAL, COM	10 pts
Total			**20 pts**

SOCLE

EXERCICE 1 Batterie du chariot élévateur – pas à pas 20 points

Contexte : Un entrepôt utilise des chariots élévateurs électriques. Le technicien de maintenance vérifie la batterie plomb-acide du chariot : **48 V — 500 Ah**.

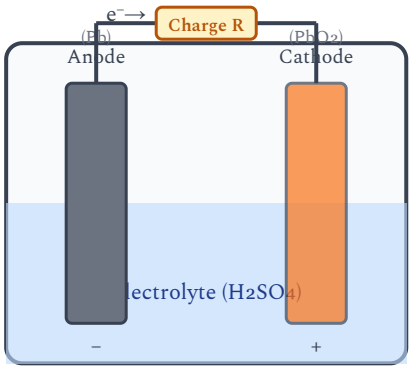


Schéma simplifié d'un élément de batterie plomb-acide en décharge

1. APP En vous aidant du schéma, compléter les phrases suivantes : 4 pts

a) L'électrode en plomb (Pb) est le pôle _____ (+ ou –). On l'appelle l'_____ .

b) L'électrode en PbO_2 est le pôle _____ (+ ou –). On l'appelle la _____ .

c) À l'anode, il se produit une réaction d'_____ (oxydation ou réduction).

d) L'électrolyte est une solution d'acide _____ (formule : H_2SO_4).

…

2. REA Calculer l'énergie stockée dans la batterie. On vous guide étape par étape : 6 pts

Étape 1 : Recopier la formule : E (Wh) =_____ × _____

Étape 2 : Remplacer : E =_____ × _____ = _____ Wh

Étape 3 : Convertir en kWh : E =_____ Wh ÷1 000 = _____ kWh

Étape 4 : Convertir en joules (1 Wh = 3 600 J) :
E =_____ ×3 600 = _____ J = _____ MJ

…

3. ANA Le chariot consomme en moyenne $P = 2\,\text{kW} = 2\,000$ W. Calculer l'autonomie : 4 pts

Formule : $t = \dfrac{E\ (\text{Wh})}{P\ (\text{W})}$

$t = \dfrac{_____}{_____} =$_____ h

La durée d'un poste de travail est de 8 heures. La batterie est-elle suffisante ? _____ (oui / non)

…

4. VAL On compare avec une batterie Li-ion de même énergie (24 kWh). Compléter le tableau : 6 pts

Technologie	Densité d'énergie	Masse $m = E/d$
Plomb-acide	35 Wh/kg	$m = 24\,000 \div 35 =$ _____ kg
Li-ion	200 Wh/kg	$m = 24\,000 \div 200 =$ _____ kg

La batterie Li-ion est _____ fois plus légère que la batterie plomb.

Citer un avantage du Li-ion : _____

Citer un inconvénient du Li-ion : _____

…

STANDARD

EXERCICE 1 — Batterie plomb-acide du chariot élévateur — 10 points

Contexte : Un entrepôt logistique utilise des chariots élévateurs électriques équipés de batteries plomb-acide. Dans le cadre de la maintenance préventive, le technicien doit vérifier l'état et le dimensionnement de la batterie principale (48 V — 500 Ah).

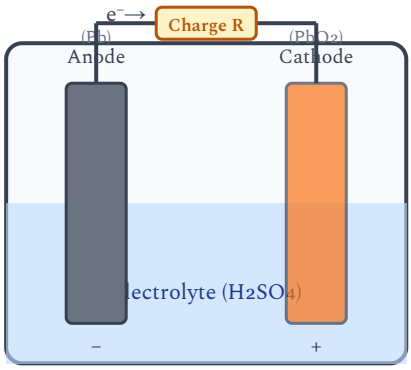


Schéma simplifié d'un élément de batterie plomb-acide en décharge

1. APP En vous aidant du schéma ci-dessus, identifier et légender : l'électrode positive (cathode), l'électrode négative (anode), l'électrolyte. Préciser la nature chimique de chaque élément dans une batterie plomb-acide. 2 pts

…

2. ANA Lors de la décharge de la batterie, des réactions d'oxydoréduction ont lieu aux électrodes. Écrire les deux demi-équations simplifiées suivantes :

— Oxydation à l'anode : $\mathrm{Pb} \rightarrow \mathrm{Pb}^{2+} + 2e^-$

— Réduction à la cathode : $\mathrm{PbO_2} + 4\mathrm{H}^+ + 2e^- \rightarrow \mathrm{Pb}^{2+} + 2\mathrm{H_2O}$

Indiquer, pour chaque demi-équation, quelle espèce est oxydée et quelle espèce est réduite.

2 pts

…

3. REA La batterie du chariot a les caractéristiques suivantes : tension nominale $U = 48\ \mathrm{V}$, capacité $C = 500\ \mathrm{Ah}$.

a) Calculer l'énergie stockée en Wh : $E\,(\text{Wh}) = U \times C$.

b) Convertir cette énergie en mégajoules (rappel : $1\,\text{Wh} = 3\,600\,\text{J}$). 3 pts

…

4. VAL Le chariot consomme en moyenne une puissance de $P = 2\,\text{kW}$. En utilisant l'énergie calculée en Wh à la question 3, calculer l'autonomie théorique du chariot (en heures). La durée d'un poste de travail est de 8 heures : la batterie est-elle suffisante ? Conclure. 3 pts

…

EXERCICE 2 Comparaison Li-ion vs Plomb-acide 10 points

Contexte : L'entreprise envisage de remplacer les batteries plomb-acide des chariots par des batteries lithium-ion (Li-ion). Le tableau suivant compare les caractéristiques des deux technologies pour un besoin énergétique de **24 kWh**.

Technologie	Densité d'énergie (Wh/kg)	Tension nominale par élément	Nombre de cycles de charge
Plomb-acide	35 Wh/kg	2 V/élément	300 – 500
Li-ion	200 Wh/kg	3,7 V/élément	500 – 2 000

1. APP En lisant le tableau ci-dessus, extraire les deux valeurs de densité d'énergie (Wh/kg) pour chaque technologie. Quel paramètre est lié à la masse de la batterie pour un même besoin énergétique ? 2 pts

…

2. ANA La masse d'une batterie se calcule par : $m = \dfrac{E\,(\text{Wh})}{\text{densité d'énergie}\,(\text{Wh/kg})}$. Pour un besoin de $E = 24\,\text{kWh} = 24\,000\,\text{Wh}$, calculer la masse de la batterie Li-ion (densité : 200 Wh/kg). 2 pts

…

3. REA Calculer la masse de la batterie plomb-acide équivalente (densité : 35 Wh/kg) pour le même besoin de 24 kWh. Présenter la démarche complète. 3 pts

…

4. VAL Comparer les deux masses obtenues. Calculer le rapport de masse $m_{Pb}/m_{Li\text{-}ion}$. Conclure sur l'intérêt de la technologie Li-ion pour un chariot élévateur, en prenant en compte la masse et la durée de vie (nombre de cycles). 2 pts

…

5. COM Citer **un avantage** et **un inconvénient** de la technologie Li-ion par rapport au plomb-acide en milieu industriel. 1 pt

...

APPROFONDISSEMENT

EXERCICE 1 Dimensionnement et coût d'exploitation – Chariot élévateur — 10 points

Contexte : Un responsable de maintenance gère un parc de 5 chariots élévateurs électriques dans un entrepôt logistique. Chaque chariot est équipé d'une batterie plomb-acide **48 V — 500 Ah**. Le rendement du chargeur est de **85 %** et le coût de l'électricité est de **0,15 €/kWh**. L'entreprise envisage le passage au Li-ion (densité 200 Wh/kg, coût 280 €/kWh, 1 500 cycles).

1. REA Calculer l'énergie stockée dans une batterie Pb (en kWh) et la masse correspondante (densité Pb : 35 Wh/kg). 2 pts

...

2. REA Calculer l'énergie prélevée au réseau pour une recharge complète (rendement chargeur 85 %) et le coût d'une recharge. 2 pts

...

3. ANA Calculer le coût mensuel de recharge du parc complet (5 chariots, 20 recharges/mois chacun). Proposer une stratégie pour réduire ce coût. 2 pts

...

4. ANA Pour le remplacement Li-ion : calculer la masse et le coût d'investissement d'une batterie Li-ion de même énergie (24 kWh, densité 200 Wh/kg, coût 280 €/kWh). Calculer le gain de masse par chariot. 2 pts

...

5. VAL En supposant que la batterie Li-ion dure 1 500 cycles (≈ 6 ans à 250 jours/an), calculer le coût d'amortissement journalier de la batterie Li-ion (investissement seul). Ajouter le coût de recharge quotidien. Comparer le coût total journalier avec la solution Pb (amortissement Pb : 5 €/jour, recharge : 4,24 €/jour). Conclure. 2 pts

...

EXERCICE 2 Engin de chantier hybride : batterie Li-ion vs diesel 10 points

Contexte : Un bureau d'étude compare deux solutions d'alimentation pour un engin de chantier hybride devant travailler **8 heures par jour** avec une puissance moyenne de **20 kW**.

- **Solution A – Batterie Li-ion :** densité 200 Wh/kg, coût 300 €/kWh, rendement batterie 90 %, durée de vie 1 500 cycles
- **Solution B – Moteur diesel :** 1 litre de gazole ≈ 10 kWh d'énergie thermique, rendement moteur 35 %, prix du gazole 1,80 €/L

1. REA Calculer l'énergie mécanique nécessaire pour une journée de travail (8 h à 20 kW). 1 pt

...

2. REA **Solution A :** Calculer l'énergie à stocker dans la batterie Li-ion (rendement 90 %) et la masse de la batterie. 2 pts

...

3. REA **Solution A :** Calculer le coût d'investissement de la batterie. 1 pt

...

4. ANA **Solution B :** Calculer le volume de gazole consommé par jour et le coût quotidien en carburant. 2 pts

...

5. VAL En supposant que l'engin travaille 250 jours/an et que la batterie dure 5 ans (1 250 jours), calculer le coût énergétique journalier complet de la solution A (amortissement + recharge à 0,15 €/kWh). Comparer avec le diesel. Conclure en intégrant les aspects environnementaux. 3 pts

…

6. COM Rédiger un paragraphe de synthèse (5 lignes minimum) présentant au client les avantages et limites de chaque solution, en justifiant votre recommandation. 1 pt

…