

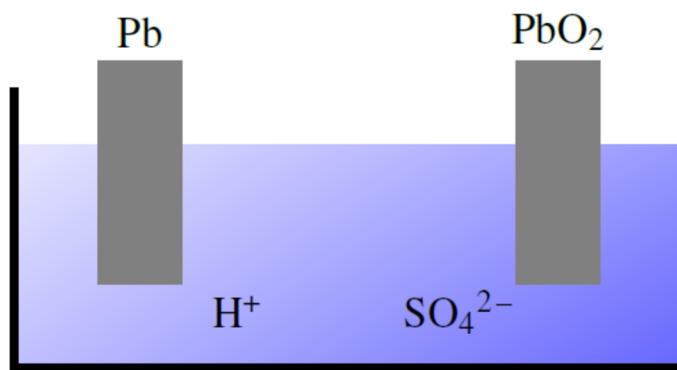
## 05 – Piles et batteries

Les notes de ce chapitre sont fortement basées (parfois carrément reproduites) sur les notes de M. Luc Tremblay pour son cours électricité et magnétisme qui se trouvent [ici](#). Merci M. Tremblay!

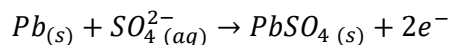
### 05.1 Le fonctionnement d'une pile

Nous allons illustrer comment on peut maintenir une différence de potentiel entre deux bornes avec une réaction chimique en prenant l'exemple d'une batterie d'auto. Une batterie est simplement un ensemble de piles. Dans une batterie d'auto, nous avons 6 piles donnant chacune une différence de potentiel d'environ 2 V, pour un total de 12 V entre les bornes de la batterie. Les **piles** sont aussi appelées **cellules** et les deux termes sont utilisés dans ce chapitre.

Une telle pile est formée d'une borne en plomb et d'une borne en oxyde de plomb (IV) ( $\text{PbO}_2$ ) baignant dans une solution aqueuse d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). On retrouvera donc des ions  $\text{H}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  en solution.

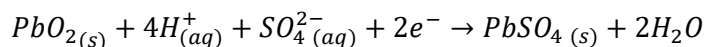


Examinons ce qui se passe à chaque borne. Il se produit la réaction suivante à la tige de plomb.

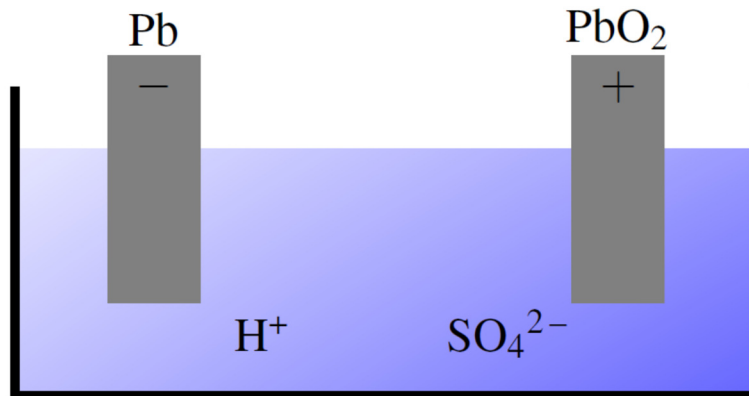


La tige de plomb va donc accumuler des électrons et se charger négativement de telle sorte que son potentiel devient négatif. La réaction cessera un moment donné si la tige devient trop négative, car elle repoussera alors les ions sulfate qui sont aussi négatifs. La charge et le potentiel de cette tige se stabilisent donc à une certaine valeur.

Examinons maintenant ce qui se passe à la tige d'oxyde de plomb (IV). On a alors la réaction suivante.

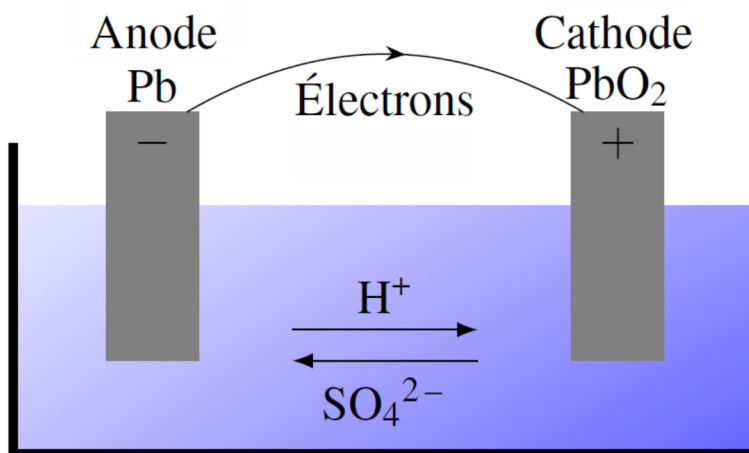


La tige d'oxyde de plomb (IV) va donc perdre des électrons et se charger positivement de telle sorte que son potentiel devient positif. La réaction cessera un moment donné si la tige devient trop positive, car elle repoussera les ions hydrogène (protons) qui sont aussi positifs. La charge et le potentiel de cette tige se stabilisent donc à une certaine valeur.



On a donc une tige dont le potentiel a augmenté, et une tige dont le potentiel a baissé. Quand le tout s'est stabilisé, la différence de potentiel entre les bornes est de 2,05 V.

Si on branche un conducteur entre les deux bornes, les électrons circuleront dans le fil en allant de la borne négative à la borne positive et on aura un courant.



La borne qui reçoit des électrons (ici la tige d'oxyde de plomb (IV)) porte le nom de *cathode* et la tige qui donne des électrons (ici la tige de plomb) porte le nom d'*anode*.

Ce courant pourra durer assez longtemps. En effet, en enlevant des électrons de la borne négative, la charge de la tige d'oxyde de plomb (IV) baisse un peu et la réaction chimique pourra recommencer à cette borne pour fournir des électrons. En amenant des électrons à la borne positive, la charge de la tige baisse légèrement, ce qui permet à la réaction chimique de recommencer, ce qui éliminera le surplus d'électrons. Le courant va donc continuer tant que la réaction fournira des électrons à la cathode et les éliminera à l'anode. Le tout cessera quand un des produits nécessaires à la réaction s'épuisera (une des tiges ou l'acide

sulfurique dans l'eau). Typiquement, il y aura un transfert de 180 000 C dans une pile de ce genre dans une batterie d'auto avant que la réaction ne cesse.

Pour terminer, voici quelques notes concernant les batteries.

- Dans tous les cas, l'énergie fournie par la batterie est obtenue par une réaction chimique.
- La réaction d'une batterie d'auto est facilement réversible et c'est pour cela qu'on peut recharger la batterie. Dans certaines batteries, la réaction n'est pas réversible et elles ne peuvent pas être rechargées.
- À mesure qu'une batterie d'auto se décharge, la quantité d'acide sulfurique dans la solution diminue. Comme la densité de l'acide sulfurique est de 1,85 et que celle de l'eau est de 1, on peut vérifier si la batterie est chargée ou non en mesurant la densité du liquide. Quand la batterie est chargée, il y a beaucoup d'acide et la densité est aux alentours de 1,28. Quand il ne reste que 50 % de la charge, la densité est près de 1,18 et elle descendra à 1,08 quand la batterie est déchargée.
- Selon la réaction chimique, la différence de potentiel prendra une certaine valeur spécifique. Toutefois, une pile ne fournira toujours que quelques volts, jamais des centaines ou des milliers de volts.
- Si votre batterie d'auto se décharge trop, il est possible que des cristaux de  $\text{PbSO}_4$  se détachent des électrodes et tombent au fond de la batterie. En perdant ainsi le contact avec les électrodes, il sera impossible de reconvertir ces cristaux en plomb ou en oxyde de plomb (IV) en rechargeant la batterie. Ainsi, la batterie ne pourra pas être rechargée autant qu'une batterie neuve et elle deviendra moins performante.
- La différence de potentiel n'est jamais bien grande avec une batterie, mais la quantité de charge qu'on peut obtenir est assez impressionnante. Une batterie d'auto pourra fournir 180 000 C en transformant 196 g d'acide sulfurique.

## 05.2 Tension en circuit ouvert et circuit fermé

La tension qui est mesurée lorsque une pile n'est pas dans un circuit se nomme **tension en circuit ouvert** (TCO). La tension qui est mesurée lorsque une pile fournit du courant dans un circuit se nomme **tension en circuit fermé** (TCF). La TCO est toujours plus grande que la TCV puisque la pile peut maintenir une plus grande pression électrique lorsqu'il n'y a pas de courant qui la traverse. La TCO d'une batterie d'avion de 12V peut atteindre jusqu'à 14.4V selon la batterie. Les manufacturiers fournissent des tableaux qui permettent d'estimer le niveau de charge d'une batterie en fonction de la TCO. Le tableau suivant en est un exemple :

TCO (V)		Niveau de charge (%)
Batterie 12V	Batterie 24V	
12.9 ou plus	25.8 ou plus	100
12.6	25.2	75
12.3	24.6	50
12.0	24.0	25
11.7 ou moins	23.4 ou moins	0

Lorsqu'une charge, même petite, est mise aux bornes de cette batterie, la TCF sera tout près de 12V. Donc, lorsqu'on parle d'une batterie 12V, on réfère à la tension d'opération de la batterie (TCF) et non la tension mesurée sans charge (TCO).

La TCF d'une batterie est affectée par deux facteurs : la charge appliquée au circuit et le niveau de charge restant de la batterie. Lorsque la batterie est connectée à une grande résistance, la TCF est plus basse que pour une petite résistance. Si la batterie est presque vide, la TCF est plus basse que lorsqu'elle est pleine. La figure suivante montre l'effet de ces deux facteurs sur la TCF.

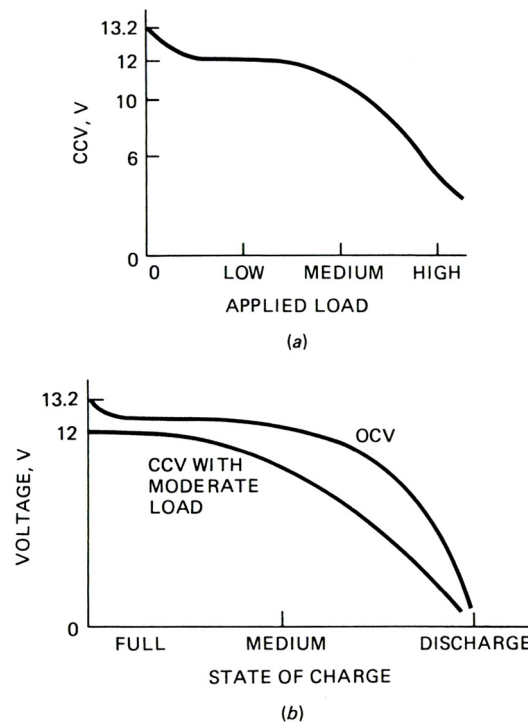
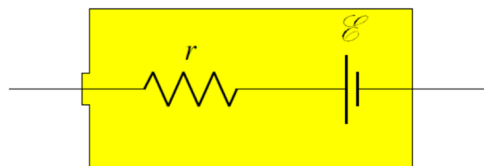


Figure 1- TCF en fonction de la résistance (a) et du niveau de charge (b) - Eismín

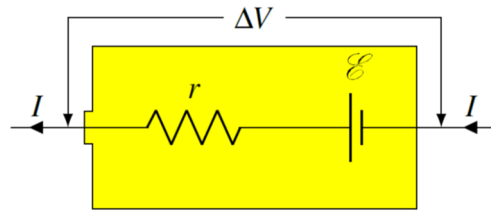
### 05.3 La résistance interne des piles

La pile fournit du courant

Toutes les piles (et les autres générateurs de courant qu'on verra plus tard) ont une résistance interne. Cela fait que la différence de potentiel aux bornes de la pile n'est pas toujours égale à  $\mathcal{E}$ . On peut donc considérer qu'une pile est constituée des deux éléments suivants : une source et une résistance.



Si la pile fournit du courant, la différence de potentiel aux bornes de la pile ne sera pas  $\mathcal{E}$  parce qu'on perdra une partie du potentiel aux bornes de la résistance.



La différence de potentiel sera donc de

**Différence de potentiel aux bornes d'une pile donnant un courant  $I$  et ayant une résistance interne  $r$**

$$\Delta V_{pile} = E - rI$$

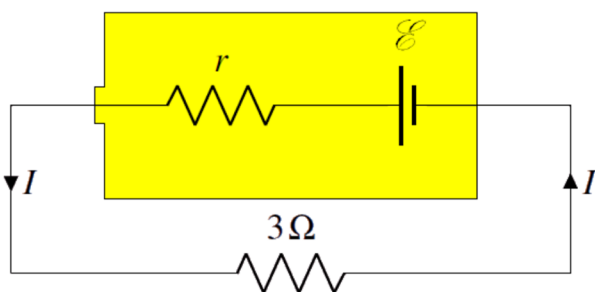
On voit que plus la pile fournit du courant, plus la différence de potentiel aux bornes de la pile sera petite.

La résistance interne ne provient pas uniquement du passage du courant dans une substance. Par exemple, dans le cas d'une pile chimique, elle inclut les limites imposées à la pile par le rythme auquel peut se produire la réaction chimique. Si on demande trop de courant à une pile chimique, il est possible que la réaction chimique ne puisse pas fournir les charges assez rapidement pour soutenir un tel courant. Les bornes vont alors se décharger, ce qui va diminuer la différence de potentiel entre les bornes, exactement comme le prédit notre équation avec la résistance interne.

Pour une pile sèche (pile utilisée dans les appareils à la maison, comme les AAA), la résistance interne est d'environ  $0,05 \Omega$  quand la pile est neuve. Elle va cependant monter lentement pour atteindre  $1 \Omega$  quand la pile est presque déchargée. Dans une batterie d'automobile, la réaction chimique peut se produire très rapidement et fournir des courants très intenses. Cela veut dire que la résistance interne est très faible, c'est-à-dire aux environs de  $0,001 \Omega$ .

### Exemple

Une pile ayant  $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$  et une résistance interne de  $0,05 \Omega$  est branchée à une résistance de  $3 \Omega$ .



Quel est le courant passant dans la résistance ?

En appliquant la loi de Kirchhoff sur la maille (on commence en haut à droite et on va dans le sens contraire des aiguilles d'une montre), on a

$$\begin{aligned} 12V - 0,05\Omega \cdot I - 3\Omega \cdot I &= 0 \\ I &= 3,93A \end{aligned}$$

Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la pile ?

La différence de potentiel aux bornes de la pile est

$$\begin{aligned} \Delta V &= E - rI \\ &= 12V - 0,05\Omega \cdot 3,93A \\ &= 11,804V \end{aligned}$$

### Le niveau de charge

Comme nous l'avons vu plus haut, le niveau de charge restant affecte aussi la pile. La valeur de  $r$  n'est donc pas constante mais dépendra de la TCF et de la TCO en plus de varier selon la charge appliquée. Voici une définition plus précise de la résistance interne

#### Résistance interne de la pile en fonction de la TCF, TCO et du courant

$$r = \frac{TCO - TCF}{I}$$

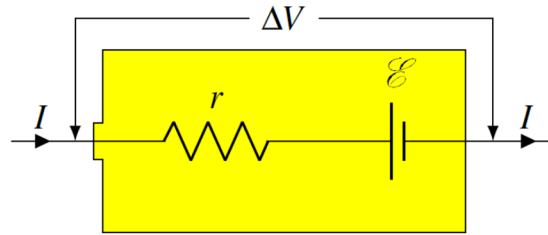
Par exemple, si une batterie 12V a une TCO de 14V, une TCF de 12V et fournit 100A dans une charge, la résistance interne sera de  $0.02\Omega$  :

$$\begin{aligned} r &= \frac{TCO - TCF}{I} \\ &= \frac{14V - 12V}{100A} \\ &= \frac{2V}{100A} \\ &= 0.02\Omega \end{aligned}$$

Comme on l'a vu à la Figure 1, la TCF baisse plus rapidement que la TCO à mesure que la pile se décharge. Par conséquent, la résistance interne de la pile augmente lorsqu'elle se décharge.

### La pile reçoit du courant

Il arrive parfois qu'une pile reçoive du courant plutôt que d'en donner. Cela se produit, par exemple, quand on recharge une pile. On a alors



La différence de potentiel totale est donc

**Différence de potentiel aux bornes d'une pile recevant du courant  $I$  et ayant une résistance interne  $r$**

$$\Delta V_{pile} = E + rI$$

La différence de potentiel aux bornes de la pile est donc plus grande que celle qu'on a quand la pile est débranchée.

## 05.4 Cellule primaire et cellule secondaire

### Cellule primaire

Les cellules primaires sont les piles qui ne peuvent pas être rechargées. À mesure que la pile fournit du courant, un ou plusieurs de ses matériaux qui la compose se détériorent. Les piles AA communes faites de zinc et de carbone en sont un exemple. L'anode se détériore en passant en solution avec l'électrolyte.

### Cellule secondaire

Lorsque les anodes et cathodes des cellules secondaires fournissent du courant, elles subissent une transformation chimique qui peut être renversée. En d'autres mots, les cellules secondaires peuvent être rechargées. Pour ce faire, on applique une tension supérieure à celle normalement produite par la pile aux bornes de celle-ci. Ceci produit un courant dans la direction inverse, inversant la transformation chimique qui sert normalement à produire le courant. Ce processus peut être répété plusieurs fois. Chaque cycle détériore légèrement la pile. Éventuellement, elle doit être remplacée.

## 05.5 Types de piles

### Piles zinc-carbone

La pile zinc-carbone est un type de pile sèche, qui sont appelées ainsi puisque l'électrolyte n'est pas à l'état liquide. L'électrolyte est plutôt sous forme de pâte, ce qui élimine les risques de renversement. La figure suivante montre la composition typique d'une pile sèche. Dans le cas de la pile zinc-carbone, l'anode (5) est formée de zinc. L'électrolyte (7) est mélangé avec du dioxyde de manganèse ( $\text{MnO}_2$ ), qui empêche l'accumulation d'hydrogène à la cathode. La cathode (6) est faite de carbone. Une pile zinc-carbone produit une tension de 1,5V.

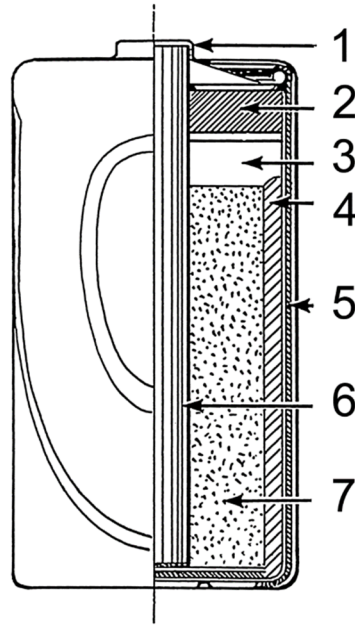


Figure 2 By Pearson Scott Foresman - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6968348>

### Piles alcalines

Les piles qui utilisent un électrolyte alcalin sont appelées piles alcalines. Cet électrolyte est composé principalement d'hydroxide de potassium (KOH). C'est un puissant caustique similaire à la lessive domestique et peut causer de graves brûlures s'il entre en contact avec la peau. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour les électrodes, tels que dioxyde de manganèse et zinc, oxide d'argent et zinc, oxide d'argent et cadmium, oxide de mercure et zinc, ou encore nickel et cadmium. Ces matériaux déterminent si la pile est rechargeable (cellule secondaire) ou non (cellule primaire) et la tension aux bornes (la plupart produisant environ 1.5V).

### Piles nickel-cadmium

Les piles nickel-cadmium peuvent être primaires ou secondaires, selon les matériaux utilisés. Elle peuvent être fabriquées en grande dimensions et assemblées en batteries pour leur utilisation dans un avion. Ces dernières ont un électrolyte liquide et sont faites de plusieurs cellules secondaires. Lorsque la cellule est chargée, les anodes se composent de cadmium (Cd) et les cathodes de d'oxyhydroxide de nickel (NiOOH). Lorsqu'elles se déchargent, la composition des électrodes change; les anodes devient de l'hydroxide de cadmium (CdOH), et les cathodes devient de l'hydroxide de nickel (Ni(OH)<sub>2</sub>). La tension aux bornes des piles nickel-cadmium est de 1.2V.

### Piles lithium-ion

Le lithium est un métal alcalin mou et léger qui offre la meilleure densité électrique de tous les matériaux couramment utilisés dans la construction de piles. Pour le rendre plus stable et sécuritaire, le lithium est ionisé pour la fabrication de piles. La densité énergétique du lithium est le double des piles nickel-cadmium. Les piles de lithium-ion donnent un voltage de 3.6V et permettent la construction de batteries utilisant moins de piles que les autres types. Elles requièrent un circuit de contrôle pour leur opération



optimale, qui va gérer la charge et la décharge en fonction de la température et de la capacité restante de la chaque pile.

### Piles plomb-acide

La pile examinée à la section 05.1 est une pile plomb-acide. Chacune de ces cellules a une TCO de 2.1V et une TCF d'environ 2V. En combinant 6 ou 12 piles de ce type, on forme des batteries de 12V et 24V utilisées en entre autres en aviation. Sur certains appareils, on place plutôt deux batteries de 12V en série pour obtenir 24V. Dans d'autres cas, on connecte deux batteries en parallèle pour doubler la capacité (deux batteries de 30Ah en parallèle donnent 60Ah).

## 05.6 Caractéristiques des batteries

La **capacité** est la mesure du courant disponible dans la batterie. Elle est exprimée en unité de courant par unité de temps. Pour les petites batteries, elle est souvent exprimée en milliampère-heure (mAh), puisqu'elles sont normalement utilisées pour fournir un courant inférieur à 1A pour plusieurs heures. Les batteries qu'on retrouve dans les avions sont spécifiées en ampère-heure (Ah). La capacité est le temps total requis pour décharger complètement la batterie, multiplié par le courant fournit par la batterie. Par exemple, si une batterie peut fournir 2A pendant 2h, elle a une capacité de 4Ah ( $2A \times 2h = 4Ah$ ). Elle pourra aussi fournir 1A pendant 4h ou encore 0.5A pendant 8h.

La capacité d'une batterie dépend du courant qu'elle fournit. Si elle se décharge rapidement, les réactions chimiques n'ont pas le temps de toutes se produire, et moins d'énergie totale peut être donnée par la batterie. La figure suivante montre que lorsque cette batterie fournit 25mA de courant, elle a une capacité de 3000 mAh. Cependant, la capacité est presque la moitié lorsqu'elle doit fournir 500 mA.

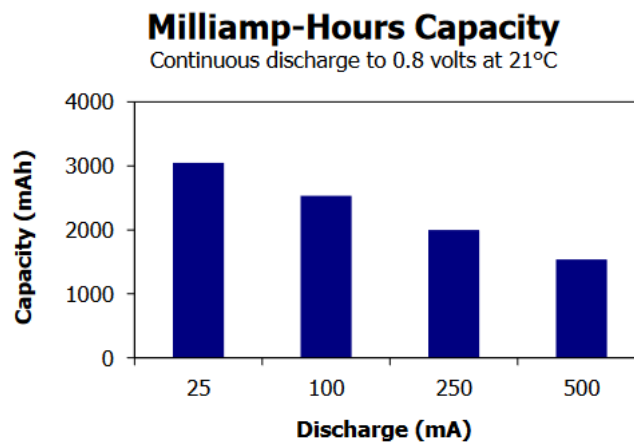


Figure 3 - Capacité d'une pile AA en fonction du courant - Energizer.com

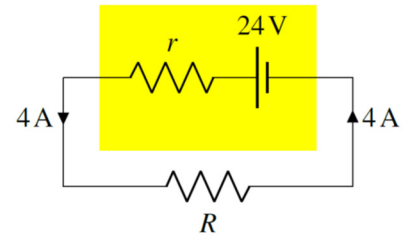
Pour avoir une base de comparaison commune entre les batteries, les manufacturiers présentent souvent la capacité C1, c'est-à-dire la capacité en Ah qu'une batterie a lorsqu'elle fournit un courant pendant 1h.

La température influence grandement la performance d'une batterie. À basse température, les réactions chimiques se déroulent beaucoup plus lentement. En conséquence, la capacité de la batterie sera grandement réduite. De plus, le temps de recharge à basse température sera largement supérieur, de

sorte que le fait d'effectuer plusieurs envolées dans une même journée peut grandement abaisser le niveau de charge d'une batterie, au point où il ne reste plus assez d'énergie pour le démarrage.

# Exercices

- Une pile d'automobile a  $\mathcal{E} = 12,4 \text{ V}$ . Quand elle fournit un courant de  $40 \text{ A}$ , la différence de potentiel diminue à  $11,8 \text{ V}$ . Quelle est la résistance interne de la pile ?
- Dans la situation montrée sur la figure, la différence de potentiel aux bornes de la pile (rectangle jaune) est de  $22 \text{ V}$ . Quelles sont les valeurs de  $r$  et  $R$  ?
- Quand une pile fournit un courant de  $1,2 \text{ A}$ , la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $12,2 \text{ V}$ . Quand la même pile fournit un courant de  $1,7 \text{ A}$ , la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $12,0 \text{ V}$ . Quelles sont la résistance interne et la valeur de  $\mathcal{E}$  de cette pile ?
- Quand une pile fournit un courant de  $1,2 \text{ A}$ , la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $12,23 \text{ V}$ . Quand on charge la même pile avec un courant de  $3,2 \text{ A}$ , la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $12,89 \text{ V}$ . Quelles sont la résistance interne et la valeur de  $\mathcal{E}$  de cette pile ?
- Quand on branche une résistance de  $20 \Omega$  aux bornes d'une pile, la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $16,4 \text{ V}$ . Quand on branche une résistance de  $50 \Omega$  aux bornes de la même pile, la différence de potentiel aux bornes de la pile est de  $17 \text{ V}$ . Quelles sont la résistance interne et la valeur de  $\mathcal{E}$  de cette pile ?
- Une pile ayant  $\mathcal{E} = 60 \text{ V}$  est branchée à une résistance de  $2 \Omega$ . La puissance dissipée dans la résistance est alors de  $1250 \text{ W}$ .
  - Quelle est la résistance interne de la pile ?
  - Quelle résistance devrait-on brancher aux bornes de la pile pour que la puissance dissipée par la résistance soit de  $900 \text{ W}$  ? (Il y a deux réponses possibles.)
- \_\_\_\_\_ est une solution d'eau et d'un composé chimique qui va permettre au courant de circuler dans une cellule.
- Dans une cellule \_\_\_\_\_, la réaction chimique qui génère le courant peut être renversée.
- Une cellule qui ne peut pas être rechargée se nomme cellule \_\_\_\_\_.
- La tension mesurée lorsqu'il n'y a pas de charge s'appelle \_\_\_\_\_ (TCO).
- La tension mesurée lorsqu'il y a une charge s'appelle \_\_\_\_\_ (TCF).
- La résistance interne d'une cellule \_\_\_\_\_ à mesure que la cellule se décharge.
- Sur les petits avions, la batterie est utilisée pour \_\_\_\_\_, les charges intermittentes et les situations d'urgence.
- La \_\_\_\_\_ est la mesure du courant total disponible dans une batterie.
- Les petites piles sont spécifiées en \_\_\_\_\_ et les grandes piles en \_\_\_\_\_.
- Une batterie acide-plomb de  $24 \text{ V}$  est faites de \_\_\_\_\_ cellules de \_\_\_\_\_ V.



# Réponses

1.  $0,015 \Omega$
2.  $r = 0,5 \Omega$  et  $R = 5,5 \Omega$
3.  $r = 0,4 \Omega$  et  $\mathcal{E} = 12,68 \text{ V}$
4.  $r = 0,15 \Omega$  et  $\mathcal{E} = 12,41 \text{ V}$
5.  $r = 1,25 \Omega$  et  $\mathcal{E} = 17,425 \text{ V}$
6. a)  $0,4 \Omega$   $3,149 \Omega$  ou  $0,05081 \Omega$
7. L'Électrolyte
8. Secondaire
9. Primaire
10. Tension en circuit ouvert
11. Tension en circuit fermé
12. Augmente
13. Le démarrage
14. Capacité
15. mAh, Ah
16. 12, 2