



## 17 EXERCICE DE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

### Exercice 17.4 : La batterie électrochimique

La batterie électrochimique est au cœur de problèmes d'applications stationnaires et de mobilités, dont notamment les voitures électriques. Un usager utilise aujourd'hui une voiture diesel et souhaiterait la comparer par rapport à d'une voiture électrique. L'utilisateur consomme en moyenne 6 L/100 km avec un réservoir de 50 L. Le facteur d'émission de GES de l'essence (PJ essence) est de 2 289 gCO<sub>2</sub>eq/L. Les accumulateurs utilisés pour la voiture électrique sont des cellules Lithium-ion type 18650, avec une tension nominale de 3,6 V et une capacité de 3400 mAh. On suppose que la consommation moyenne de la voiture électrique serait de 17 kWh/100 km. L'utilisateur désire une autonomie de 600 km. Il est difficile d'estimer précisément l'empreinte carbone de la production d'une batterie, ici, on supposera que les émissions GES sont de l'ordre de 150 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh\*.

Données\*\* :

- $PCI_{essence} = 46,5 \text{ MJ/kg}$
- $Densité_{essence} = 750 \text{ kg/m}^3$
- $PCI_{Li-ion} = 170 \text{ Wh/kg}$

\* source: Han Hao, April 2017, GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China

<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/4/504/htm>

\*\* source : TEQ\_ESA\_Facteurs\_emissions\_pertinents 2018

### QUESTIONS

**Question 1 :** Quelle est l'autonomie de la voiture à combustion ? (En km, arrondir à l'entier)

**Question 2 :** Quelle est l'énergie moyenne consommée par la voiture à combustion tous les 100 km (en kWh/100 km, un chiffre après la virgule) ? Comparez et commentez par rapport au 17 kWh / 100 km de la voiture électrique.

**Question 3 :** Quelle est la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par la voiture à combustion tous les km ? (en gCO<sub>2</sub>eq/km, arrondir à l'entier)

**Question 4 :** Combien de cellules Li-ion 18650 sont nécessaires pour obtenir l'autonomie désirée de la voiture électrique (arrondir à l'entier) ?

**Question 5 :** Quelle est la masse unitaire d'une cellule ? Et la masse totale de la batterie pour une autonomie de 600 km ?

**Question 6 :** Quelle est la quantité d'émissions de GES pour la fabrication d'une batterie d'une autonomie de 600 km ? Combien de km devraient alors être parcouru par la voiture électrique pour que son empreinte carbone soit plus faible que la voiture à carburant (arrondir à l'entier) ?

## RÉPONSES

**Question 1 :** Quelle est l'autonomie de la voiture à combustion ? (en km, arrondir à l'entier)

Connaissant la consommation de la voiture aux 100 km, il est possible de trouver la consommation par km. L'autonomie est finalement la quantité disponible dans le réservoir divisé par la consommation unitaire :

$$\begin{aligned} \text{Conso}_{\text{carburant}_{km}} &= \frac{\text{Conso}_{\text{essence}}}{100} = \frac{6}{100} = 0,06 \text{ L/km} \\ \text{Autonomie}_{\text{carburant}} &= \frac{V_{\text{réservoir}}}{\text{Conso}_{\text{essence}_{km}}} = \frac{50}{0,06} = 833 \text{ km} \end{aligned}$$

**Question 2 :** Quelle est l'énergie moyenne consommée par la voiture à combustion tous les 100 km (en kWh/100 km, un chiffre après la virgule) ? Comparez et commentez par rapport au 17 kWh / 100 km de la voiture électrique.

On convertit d'abord le PCI du carburant en kWh/kg :

$$\text{PCI}_{\text{essence}_{kWh_{kg}}} = \frac{\text{PCI}_{\text{essence}}[\text{MJ/kg}] * 1000[\text{MJ/kJ}]}{3600[\text{J/Wh}]} = \frac{46,5 * 1000}{3600} = 12,92 \text{ kWh/kg}$$

La consommation du carburant est L/100km, il faut multiplier par la densité pour obtenir une consommation en kg/100 km. Attention à bien diviser la densité par 1000 pour convertir les m<sup>3</sup> en L. L'énergie consommée est finalement le PCI en kWh/kg multiplié par la consommation de la voiture en kg/100km :

$$\begin{aligned} E_{\text{essence}_{kWh_{100km}}} &= \text{PCI}_{\text{essence}_{kWh_{kg}}} [\text{kWh/kg}] * \left( \frac{\text{Densité}_{\text{essence}}[\text{kg/m}^3]}{1000 \left[ \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right]} * \text{Conso}_{\text{essence}}[\text{L/100km}] \right) \\ &= 12,92 * \left( \frac{750}{1000} * 6 \right) = 58,14 \text{ kWh/100km} \end{aligned}$$

Si deux voitures identiques (en masse, en résistance au roulement et en forme), l'une électrique, l'autre à essence, devaient parcourir le même chemin dans des circonstances identiques, elles consommeraient EXACTEMENT la même énergie. Cependant, ceci est un concept théorique puisque la voiture à batterie sera nécessairement plus lourde. La voiture à essence requière 58,14 kWh en raison du faible rendement de combustion du moteur à combustion interne. En fait, ce rendement est de 0,25 à 0,27. Avec 0,27, l'énergie théorique requise serait de 15,7 kWh/100 km, le reste étant dissipé en chaleur. Pour la voiture électrique, le rendement est de 17 kWh/100 km mais si on applique le critère de rendement de conversion électrique-mécanique, on arrive à 0,92 pour obtenir 15,7 kWh/100 km (*ceteris paribus*) avec une mince portion de pertes calorifiques.

Mais *Ceteris Paribus* est faux, parce que la masse des deux véhicules NE PEUT PAS être semblable, pas en 2021, pas avant 2030 (sans doute). Le poids des batteries de 102 kWh (une Tesla) à 170Wh/kg fait au bas mot 600 kg. Les deux moteurs n'ont pas la même masse, le système de refroidissement de la voiture à essence doit être retiré, etc. Donc, certes et il serait difficile de faire du cas-par-cas. Un Kia Soul Ltd électrique pèse 1685 kg (2020) alors que sa contrepartie à essence pèse 1303 kg, ratio 1,3:1 ou 30% de plus. Mais la

Soul n'a pas une batterie de 102 kWh (elle est de 64 kWh), difficile alors de généraliser. Et il faut ajouter 40 kg d'essence à sa contrepartie à combustion!

Le PCI du carburant est certes plus important, avec 12 920 Wh/kg, que le PCI d'une batterie lithium-ion, qui est estimé ici à 170 Wh/kg (ce qui est une bonne batterie) : Un rapport de près de 80:1. Mais, si on accepte le fait que l'on puisse transporter 600 kg de batterie en permanence, cet argument ne tient plus.

**Question 3 :** Quelle est la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par la voiture à carburant tous les km ? (en gCO<sub>2</sub>eq/km, arrondir à l'entier)

Pour déterminer la quantité de CO<sub>2</sub> rejeté par la voiture à carburant, on multiplie la consommation de la voiture (ramené au km) par le facteur d'émission de GES de l'essence :

$$m_{CO_2_{essence}} = PJ_{essence} * \frac{Conso_{essence}}{100} = 2\,289 * \frac{6}{100} = 137 \frac{gCO_2eq}{km}$$

**Question 4 :** Combien de cellules Li-ion 18650 sont nécessaires pour obtenir l'autonomie désiré de la voiture électrique (arrondir à l'entier) ?

Le nombre de cellules est calculé par le rapport entre l'énergie contenue dans une batterie lithium-ion pour une certaine autonomie (ici de 600 km) et l'énergie contenue dans une seule cellule lithium-ion type 18650. L'énergie en Wh d'une cellule lithium-ion type 18650 est la multiplication entre sa tension nominale en V et sa capacité en Ah :

$$E_{cell} = U_{cell} * C_{cell} = 3,6 * \frac{3400}{1000} = 12,24 Wh$$

L'énergie en kWh de la batterie est la multiplication de l'autonomie voulue en km et la consommation électrique du véhicule (ramené au km) :

$$E_{batterie} = \left( Autonomie_{elec} * \frac{Conso_{elec}}{100} \right) = 600 * \frac{17}{100} = 102 kWh$$

Et finalement le nombre de cellules :

$$N_{cell} = \frac{E_{batterie}}{E_{cell}} * 1000 = \frac{102}{12,24} * 1000 = 8\,333 cellules$$

A noter qu'ici le nombre de cellule devrait être de 8256 cellules pour une Tesla modèle S avec une batterie Li-ion de 100 kWh.

**Question 5 :** Quelle est la masse unitaire d'une cellule (en g) ? Et la masse totale de la batterie pour une autonomie de 600 km (en kg) ?

Pour déterminer la masse d'une cellule, on divise l'énergie contenue dans une cellule (tension\*capacité ; vu précédemment question 4) par le PCI du type d'accumulateur, soit lithium-ion ici :

$$m_{cell} = \frac{U_{cell} * C_{cell}}{PCI_{Li_{ion}}} = \frac{3,6 * 3,4}{170} * 1000 = 72 \text{ g}$$

Pour la masse totale de la batterie, on calcule le rapport entre l'énergie totale contenue dans la batterie (autonomie\*conso ; vu précédemment question 4) et le PCI du type d'accumulateur, soit lithium-ion ici. Attention à bien multiplié l'énergie par 1000 pour obtenir une énergie en Wh (ou divisé le PCI par 1000 pour obtenir un PCI en kWh/kg) :

$$m_{batterie} = \frac{\left( Autonomie_{elec} * \frac{Conso_{elec}}{100} \right) * 1000}{PCI_{Li_{ion}}} = \frac{\left( 600 * \frac{17}{100} \right) * 1000}{170} = 600 \text{ kg}$$

+++++

Les défis de l'heure :

- Recycler les batteries;
- Augmenter la densité énergétique des batteries;
- Prolonger la durée de vie des batteries;
- Assurer la thermorégulation des batteries plus efficacement;
- Développer un réseau de recharge;
- Accélérer la recharge (comme chez Tesla).

Mais au-delà de toute cela, limiter l'accès à la voiture personnelle :

- Développer le transport collectif efficace et fréquent;
- Augmenter par un facteur 2 à 3 le coût des voitures;
- Créer une taxe supplémentaire lors de l'achat d'une voiture, pneus et accessoires;
- Faire payer les usagers au km annuels parcourus;
- Faire croître le coût de l'immatriculation annuel (le droit de circuler);
- Faire payer le stationnement partout sauf sur les terrains des particuliers;
- Augmenter par un facteur 5 à 10 le coût de l'essence (tant qu'il y en aura).

Des mesures impopulaires, qui limiteront la liberté de nombre de personnes et qui ne peuvent être mises en œuvre que sur une période de 10 à 20 ans. Il faut un échancier progressif pour éviter l'écroulement de l'économie. On aurait dû y penser dans les années 60-70 alors que l'on savait parfaitement ce qui se passerait! L'étalement urbain serait moindre, le nombre de voiture par personne aussi!

**Question 6 :** Quelle est la quantité d'émissions de GES pour la fabrication d'une batterie d'une autonomie de 600 km (en tCO2eq) ? Combien de km devraient alors être parcouru par la voiture électrique pour que son empreinte carbone soit plus faible que la voiture à carburant (en km, arrondir à l'entier) ?

Afin de déterminer l'émission de GES de la fabrication d'une telle batterie, on multiplie le facteur d'émission de GES de la fabrication d'une batterie type lithium-ion par l'énergie totale que contient la batterie. Cette énergie est la multiplication de l'autonomie en km désirée par la consommation de la voiture. Le résultat attendu est en tCO2eq, il faut donc bien faire attention à diviser le tout par 1000 :

$$m_{CO2_{elec}} = \frac{(P_{J_{elec}} * Autonomie_{elec} * \frac{Conso_{elec}}{100})}{1000} = \left(150 * 600 * \frac{17}{100}\right) * \frac{1}{1000} = 15,3 \text{ tCO2eq}$$

Pour retrouver le nombre de km à parcourir pour « égaliser » le bilan carbone entre un véhicule élec et véhicule à carburant, on détermine le rapport entre les quantités respectives de rejets de CO2 sachant que pour la voiture à carburant l'unité est en gCO2eq/km alors que pour la voiture électrique l'unité est fixe en tCO2eq (multiplier par 10^6 pour homogénéiser) :

$$N_{km} = \frac{m_{CO2_{elec}} * 10^6}{m_{CO2_{carburat}}} = \frac{15,3 * 10^6}{137} = 111\ 679 \text{ km}$$

Ce résultat reste un ordre de grandeur et comme vu dans l'exercice, il dépend de nombreux paramètres, comme les différentes consommations ou encore le facteur d'émission de GES de la fabrication d'une batterie qui reste difficile à estimer précisément. De plus, ici on ne prend pas en compte le fait que la voiture électrique rejette tout de même une faible quantité de CO2 lors de son utilisation, estimé à 2gCO2eq/kWh\*\*. L'objectif n'est pas de conclure si la voiture électrique est, ou pas, une meilleure solution que la voiture à combustion (dépend encore de beaucoup de choses comme la durée de vie du véhicule, la production d'électricité décarboné ou non, le nombre de cycles de la batterie, rendements, ...), mais que quel qu'il soit, l'émission de CO2 ramené aux millions d'utilisateurs par jour est un très gros chiffre.