

HYDROGEN CONVERSION TO ELECTRICITY

Exercises and problems

Stéphane Chevalier^a

^aArts et Métiers Bordeaux,
Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence.
contact : `stephane.chevalier@u-bordeaux.fr`

19 novembre 2021

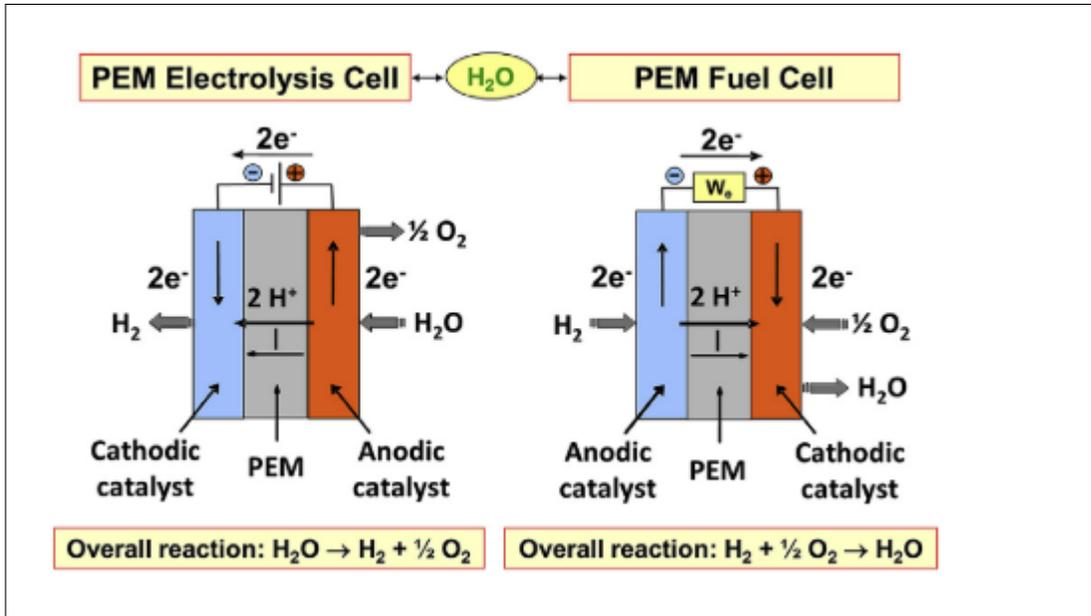
Exercise 1 : Fuel cell material

Cet exercice propose une série de questions concernant la technologie et la physique des systèmes piles à combustible.

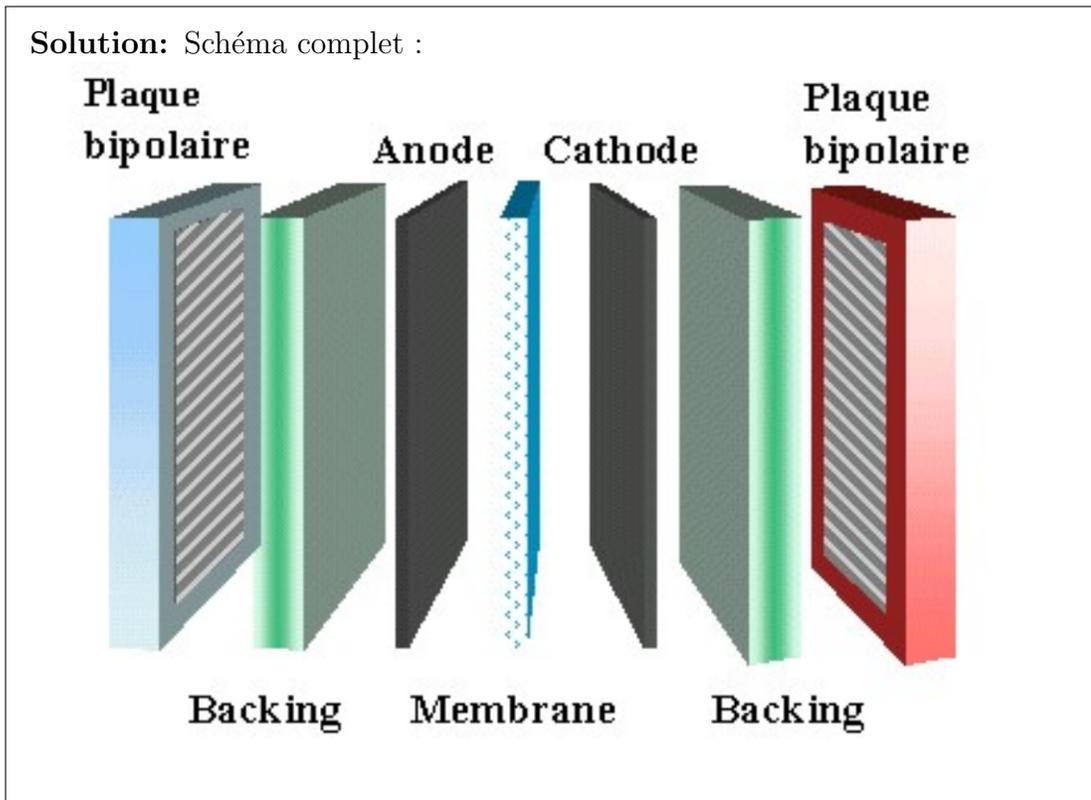
1. Schématiser un électrolyseur et une pile à combustible PEM en indiquant le sens de circulation des électrons et les demi-réaction ayant lieu à la cathode et à l'anode.

Solution: Dans le cas d'une PaC, nous avons à l'anode une oxydation de l'hydrogène (HOR en anglais) : $H_2 \longrightarrow 2e^- + 2H^+$ et à la cathode une réduction de l'oxygène (ORR en anglais) : $2H^+ + 2e^- + 1/2O_2 \longrightarrow H_2O$.

Dans le cas d'un électrolyseur, nous avons à l'anode nous avons toujours une oxydation, mais de l'eau cette fois : $H_2O \longrightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$ et à la cathode une réduction de l'oxygène des protons : $2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$.



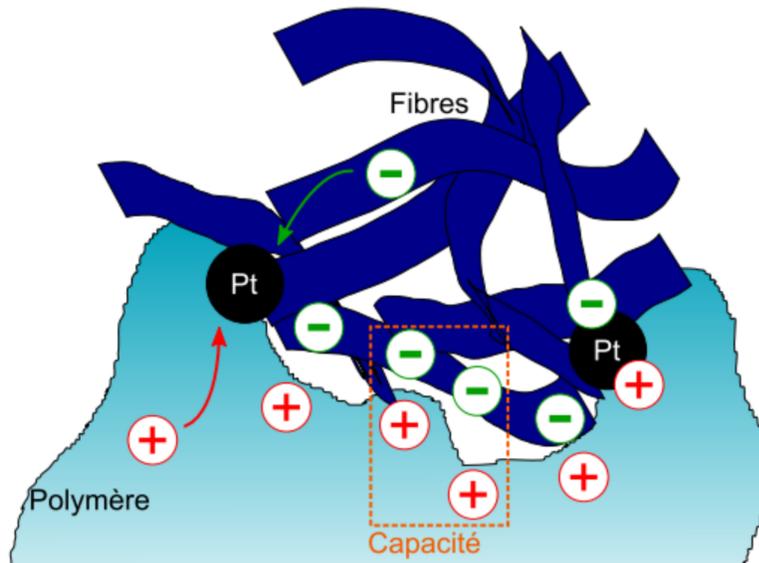
2. Placer les éléments suivants sur la Figure 1 : anode, cathode, plaques bipolaires, couche catalytique, couche de diffusion, membrane polymère (PEM).



3. Schématiser un point triple de cathode de PEMFC en plaçant les fibres de carbone, l'électrolyte et le catalyseur. Schématiser ensuite le transport des différents

éléments : électrons, protons, oxygène, eau et chaleur. Expliquer pour chacun d'entre eux le mécanisme du transport.

Solution: Point triple :



On trouve le transport des électrons dans les fibres de carbone (gradient de potentiel), celui des protons dans l'électrolyte (gradient de potentiel), celui des gaz (gradient de concentration) et enfin celui de l'eau liquide (gradient de pression capillaire). Sur le catalyseur se produit la réaction électrochimique.

4. Pour un système pile à combustible, lister l'ensemble des auxiliaires nécessaires à son fonctionnement.

Solution: Voici entre autres quelques éléments nécessaires :

- compresseur
- ventilateur de refroidissement
- convertisseur AC/DC
- détendeur H₂
- système de supervision électronique
- ...

5. Pour les applications suivantes indiquées les types de piles à combustible recommandées : véhicule extra urbain (berline), grand bâtiment, station spatiale, station de stockage d'énergie intermittente, et vélo électrique.

Solution: PEMFC, SOFC, AFC, DMFC et PEMFC.

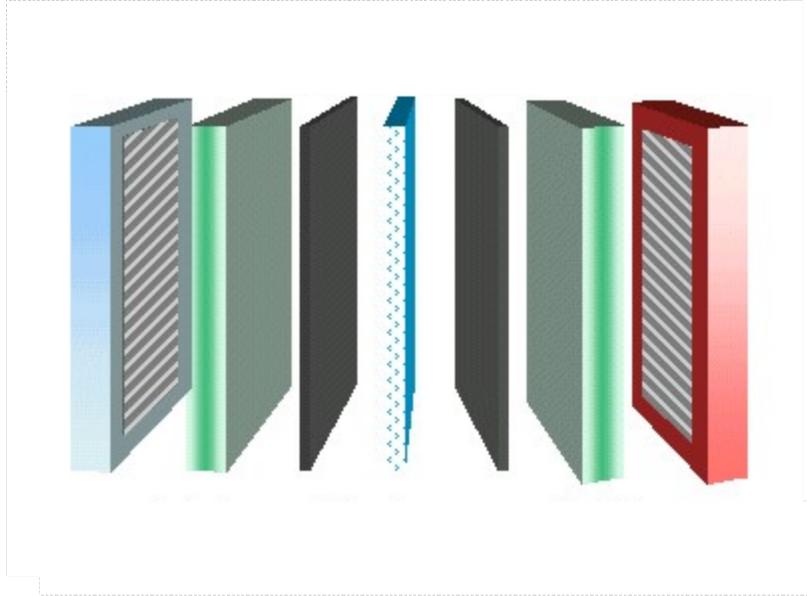


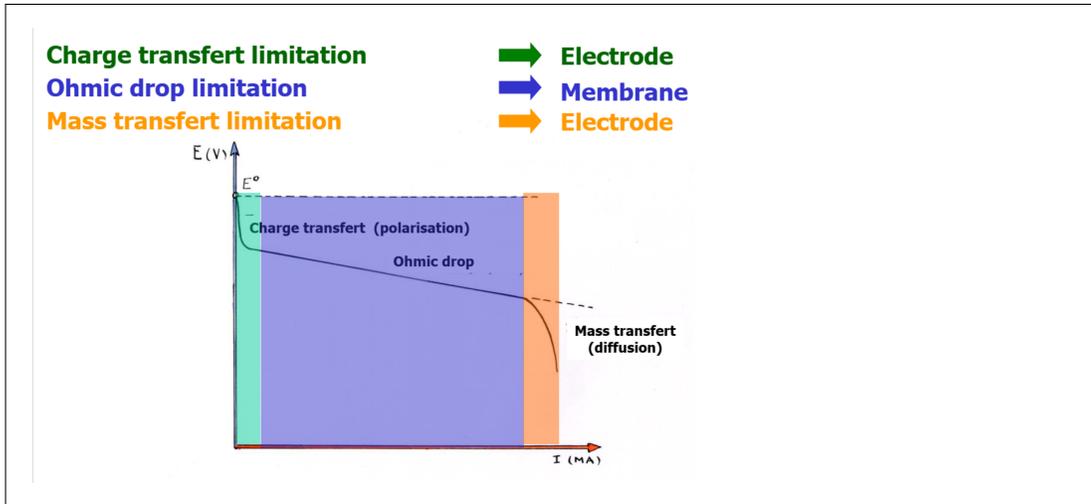
FIGURE 1 – Schéma des différents éléments composant une PEMFC.

Exercice 2 : Fuel cell polarisation curve

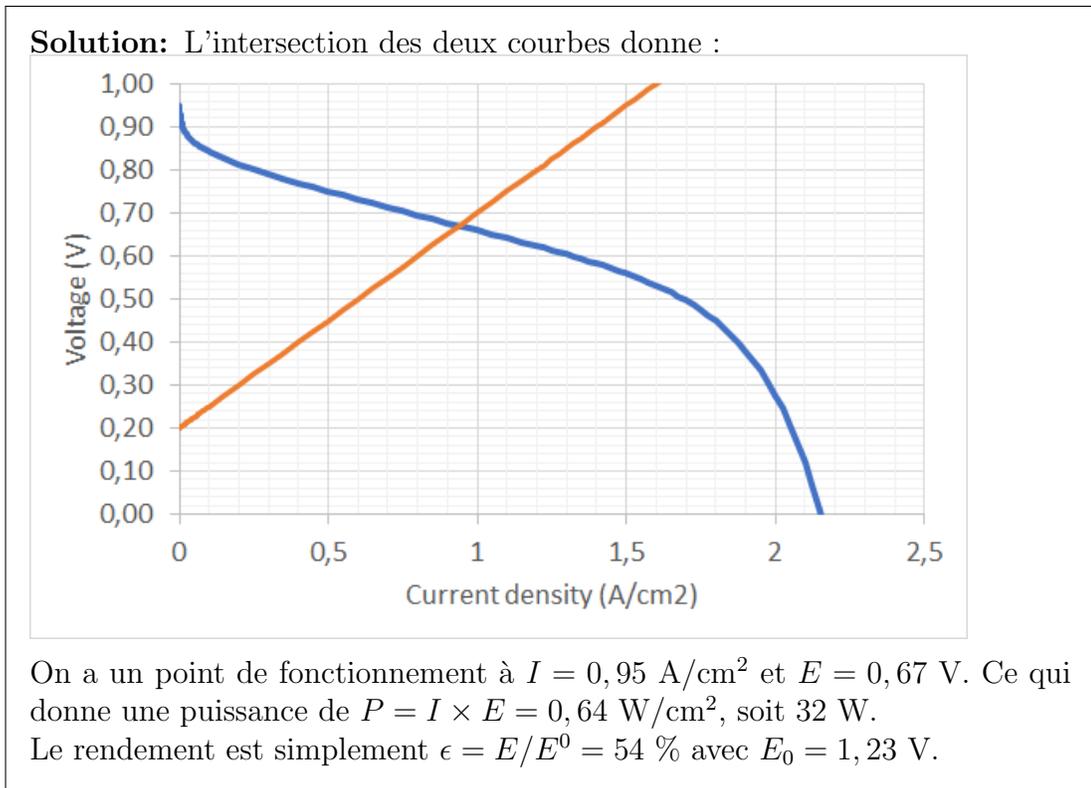
Le but de cet exercice est de mettre en pratique vos connaissances sur la courbe caractéristique des piles à combustible : la courbe de polarisation.

1. Rappeler et définir les 3 types de transferts limitant (ou régimes) rencontrés dans une PaC. Indiquer les sur la courbe de polarisation.

Solution: On définit la courbe de pola comme suit :



2. La pile à combustible, dont les performances sont données par la Figure 2, débite son courant dans une charge dont l'équation est $\Delta V_{charge} = 0,2 + r_\Omega I$ avec $r_\Omega = 0,5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Calculer la puissance électrique et le rendement au point de fonctionnement du circuit. La cellule fait 50 cm^2 .



3. Calculer les débits d'hydrogène et d'air nécessaires pour faire fonctionner la pile à combustible au point de fonctionnement considéré.

Solution: Les débits de réactifs sont :

- pour l'H₂ : $q_v = \frac{I}{nFV_m} \times 3600 \approx 20$ l/h. On prend $n = 2$ car 2 électrons échangés.
- pour l'O₂ : $q_v = \frac{I}{nFV_m} \times 3600 \approx 10$ l/h. On prend $n = 4$ car 4 électrons échangés.
- En général on utilise de l'air avec une sur-stoechiométrie. Pour une de 5, on aura $q_v \approx q_{vO_2}/0,2 \times 5 \approx 250$ l/h.

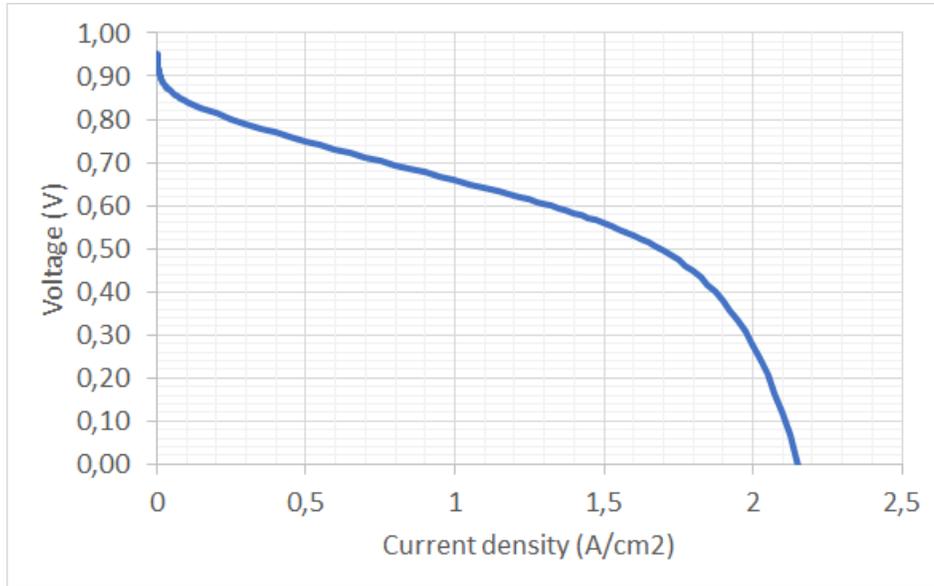


FIGURE 2 – Courbe de polarisation.

Exercice 3 : Fuel cell sizing

Vous êtes sollicités pour proposer une solution piles à combustible en remplacement d'une batterie sur un vélo électrique. Le cahier des charges est le suivant :

- le moteur électrique doit fournir une puissance de 150 W. Il possède un rendement de 91%.
- le vélo doit avoir une autonomie de 200 km pour une vitesse de 25 km/h en moyenne.

Votre fournisseur commercialise des cellules PEM de 50 cm² dont la courbe de polarisation est donnée en annexe. Ces cellules possèdent une perte de charge $\Delta p = 8 \times q_v^2$ avec le q_v le débit volumique en l/h. Le constructeur recommande une stoechiométrie en air de 3 pour un fonctionnement optimum de leur cellule.

On se propose de :

1. Déterminer un point de fonctionnement (nombre de cellule, courant, tension et rendement du stack). On négligera la consommation des auxiliaires à ce stade ;

Solution: Pour fonctionner, le moteur a besoin d'une puissance de $150/0,91 = 165$ W. C'est la puissance que devra au moins produire la PaC.

Comme habituellement, on vise un fonctionnement de cellule autour de 0,7 V pour garantir un rendement d'au moins 50%. Cela conduit à un point de fonctionnement de 25 A pour 0,67 V, soit une puissance de 16,7 W par cellule. On choisit alors de mettre 10 cellule en série, soit un stack de $P = N \times P_{cell} = 167$ W, avec un courant de 25 A et $E_{stack} = N \times E_{cell} = 6,7$ V. Cela devrait permettre d'alimenter le vélo.
Le rendement est $0,67/1,23 = 0,54$.

2. Calculer le volume nécessaire du réservoir en considérant une compression de l'hydrogène à 200 bar ;

Solution: On vise une autonomie de 8 h, soit 200 km à 25 km/h de moyenne. Le débit d'hydrogène (en considérant une stœchiométrie de 1 en H₂) est donnée par : $q_{vH_2} = N_{cell} \times IV_m / (2F) \times 3600 = 104$ l/h. Donc au bout de 8 h, nous avons consommé 832 l. Dans un réservoir à 200 bar ($p_1V_1 = p_2V_2$), nous avons donc un volume de $V_2 = 832/200 \approx 4,2$ l. Cela correspond à une masse d'environ 74 g d'H₂.

3. Calculer la perte de charge totale au sein du stack au point de fonctionnement choisi ;

Solution: Pour calculer la perte de charge, nous avons besoin de connaître le débit d'air traversant les cellules. Tout d'abord le débit d'O₂ se calcule comme suit : $q_{vO_2} = N_{cell} \times IV_m / (4F) \times 3600 = 52$ l/h. C'est normal c'est juste la moitié
En considérant une stœchiométrie de 3, et seulement 20% d'O₂ dans l'air, nous obtenons alors : $q_{vAir} = q_{vO_2} \lambda / 0,2 = 260$ l/h.
Pour des cellules en série, la perte de charge du stack est celle d'une cellule. Il faut cependant diviser le débit du stack par le nombre de cellule, i.e. $q_{vAir,1cell} = 26$ l/h. Ce qui correspond à une perte de charge de $\Delta p = 8 \times q_{vAir,1cell}^2 = 0,49$ bar.

4. En déduire le rendement global du système (stack + auxiliaire), en considérant un rendement de compresseur de 30%. Proposer une méthodologie pour dimensionner le système stack + auxiliaire.

Solution: La puissance hydraulique du compresseur est alors $P_h = q_{v,Air} \Delta p / (3600 \times 1000) = 10,6 \text{ W}$ (on prend bien le débit total qui passe dans le compresseur. Soit avec un rendement de 30%, une consommation du compresseur de $P_{comp} = 10,6 / 0,3 = 35 \text{ W}$. Ce qui n'est pas négligeable sur le système.

Le rendement devient alors $\varepsilon = \frac{N_{cell} E I - P_{comp}}{N_{cell} E^0 I} = 0,43$.

Pour dimensionner le système complet, il faudrait procéder par itération pour satisfaire la puissance fournie au moteur une fois la puissance du compresseur déduite. Un gain de rendement peut aussi être obtenu en augmentant le nombre de cellules dans le stack (mais avec un coût et un encombrement augmenté également).

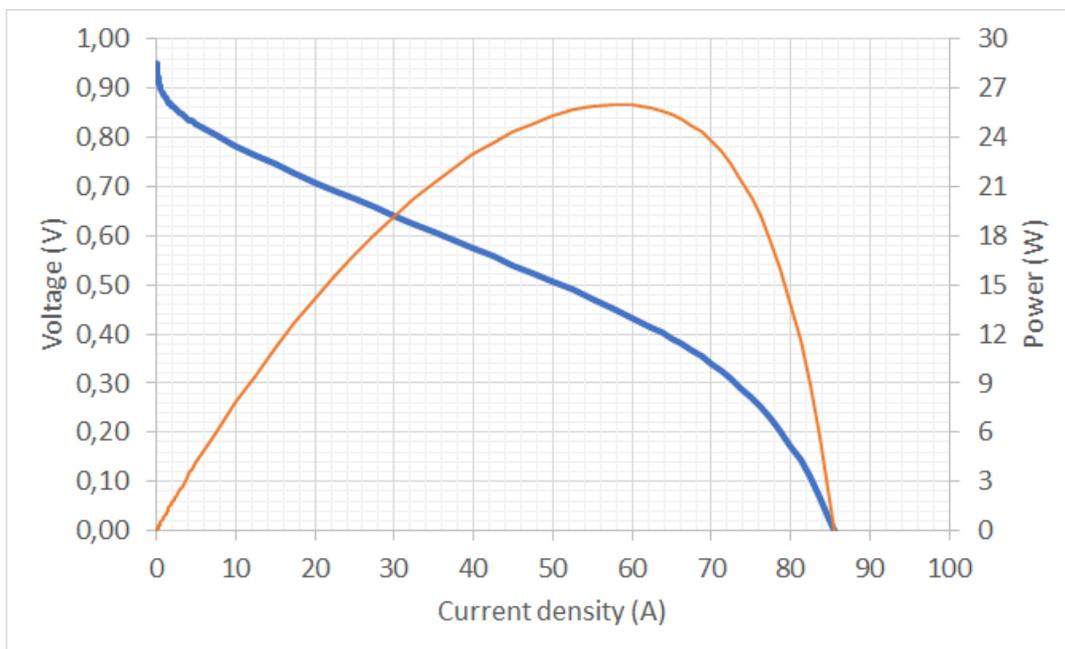


FIGURE 3 – Courbe de polarisation et de puissance d'une cellule.