Sciences
Technologies
Santé

2D

Travaux dirigés

Le CO_2, une source d'énergie pour demain ?

Auteur :

GROUPE INSA

Réalisation :

fondation UVED

Objectifs d'apprentissage :

- Étudier le stockage de l'énergie sous forme chimique
- Décrire les processus énergétiques mis en jeu dans le processus de photosynthèse
- Suivre un raisonnement technique basé sur le biomimétisme
- Étudier une pile à méthanol (aspects rédox)
- Initier une démarche de comparaison de différentes méthodes de stockage de l'énergie

Le CO_2 d'origine anthropique est décrié pour sa participation à l'effet de serre. De nombreuses équipes de recherche et des installations innovantes travaillent à le capter et à le valoriser.

- Imiter la nature

La nature sait très bien comment utiliser le CO2 pour produire de la biomasse par photosynthèse.

De nombreux travaux de recherche cherchent à reproduire ce système artificiellement.

a) Nous allons vérifier sur un exemple que cette biomasse est une réserve d'énergie chimique.

Où est stockée l'énergie des molécules ?

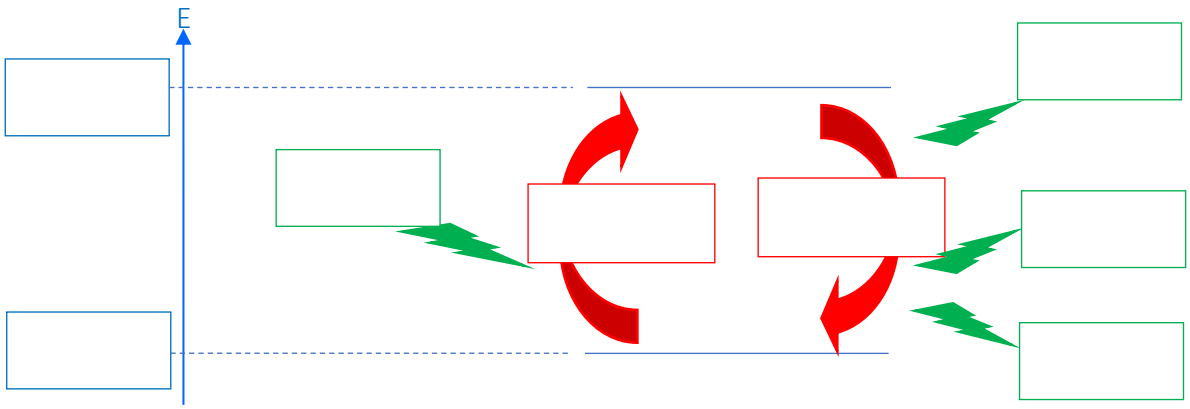
En prenant l'exemple du méthanol qui est l'une des molécules qui peut être obtenue par photosynthèse artificielle, écrire l'équation bilan de la photosynthèse et calculer l'énergie chimique qui a été stockée par mole de méthanol produit.

Liaison	Energie de liaison (* moyenne)
C-H*	412
C-C*	348
C-O*	360
O=O	496
O-H*	463
C=O*	743

Source : Loretta Jones, Peter Atkins, Molecules, Matter and Change 4th edition, 1989, Table 9.2 et 9.3

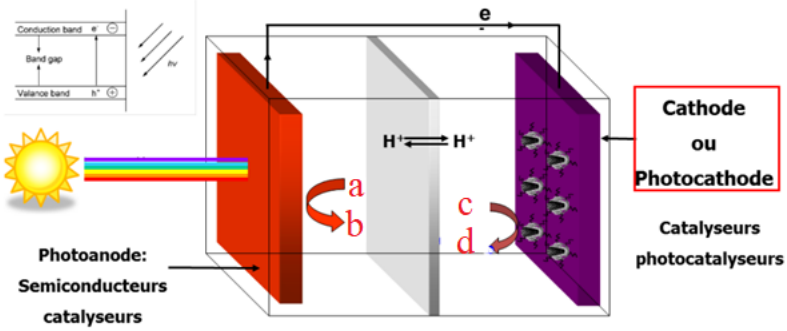
b) Compléter le schéma de principe ci-dessous à l'aide de l'extrait d'article scientifique suivant :

> « Nature's photosynthesis uses the Sun's energy with chlorophyll in plants as a catalyst to recycle carbon dioxide (CO_2) and water into new plant life. Mimicking Nature by capturing and recycling CO_2 to methanol, dimethyl ether and derived products using any alternative energy source will provide us with a sustainable carbon source for fuels and materials well beyond the fleeting fossil fuel era. »
>
> *Alain Goeppert, G.K. Surya Prakash and George A. Olah, Carbon dioxide recycling to methanol, dimethyl ether and derived products for a sustainable future, Actualité chimique, 2013, 371-372 p. 80*



- Placer les niveaux relatifs d'énergie de $CO_2 + H_2O$ et de la matière organique créée
- Placer les processus de transformation d'énergie : stockage de l'énergie solaire et utilisation de l'énergie stockée
- Placer les échanges d'énergie : énergie solaire, production de chaleur (combustion), production d'électricité, synthèse de molécules organiques et polymères d'intérêt industriel

c) Le principe d'une cellule photoélectrochimique est indiqué ci-dessous. La lumière absorbée par le matériau semi-conducteur de l'anode (à gauche) crée des paires électrons-trou dans celui-ci. Les électrons sont amenés à la cathode (à droite) par le circuit électrique. Sachant que le bilan de la réaction est « hv+ H_2O + CO_2 → O_2 + CxHyOz », déterminer la nature des molécules a, b, c et d sur le schéma ci-dessous.



Photosynthèse artificielle, Projet Collège de France, Marc Fontecave, Caroline Mellot-Draznieks
[Utilisé avec l'autorisation de Caroline Mellot-Draznieks, Collège de France]

d) La teneur de CO_2 dans l'air est de l'ordre de 400 ppm. Ce n'est pas une teneur suffisante. Proposer une source de CO_2 exploitable.

e) Dans la nature, la photosynthèse est un processus complexe qui serait infiniment lent sans la présence de nombreux catalyseurs enzymatiques. Des catalyseurs sont aussi nécessaires pour reproduire artificiellement la photosynthèse. Pourquoi l'utilisation de métaux précieux comme catalyseur n'est pas une solution satisfaisante ?

B-Avantages

a) Quel est l'intérêt crucial de convertir l'énergie solaire en énergie chimique plutôt qu'utiliser directement l'électricité produite par une cellule photovoltaïque?

b) Quel domaine du graphique ci-dessous est le moins intéressant ?

c) Le stockage d'hydrogène est une piste mais quel problème(s) présente-t-il ?

d) Quel domaine du graphique est le plus intéressant pour stocker l'énergie ? Avec des données des constructeurs automobile, calculer la masse et le volume de batterie comparées à l'essence nécessaires pour parcourir 500 km. Quel est le problème lié aux molécules associées ?

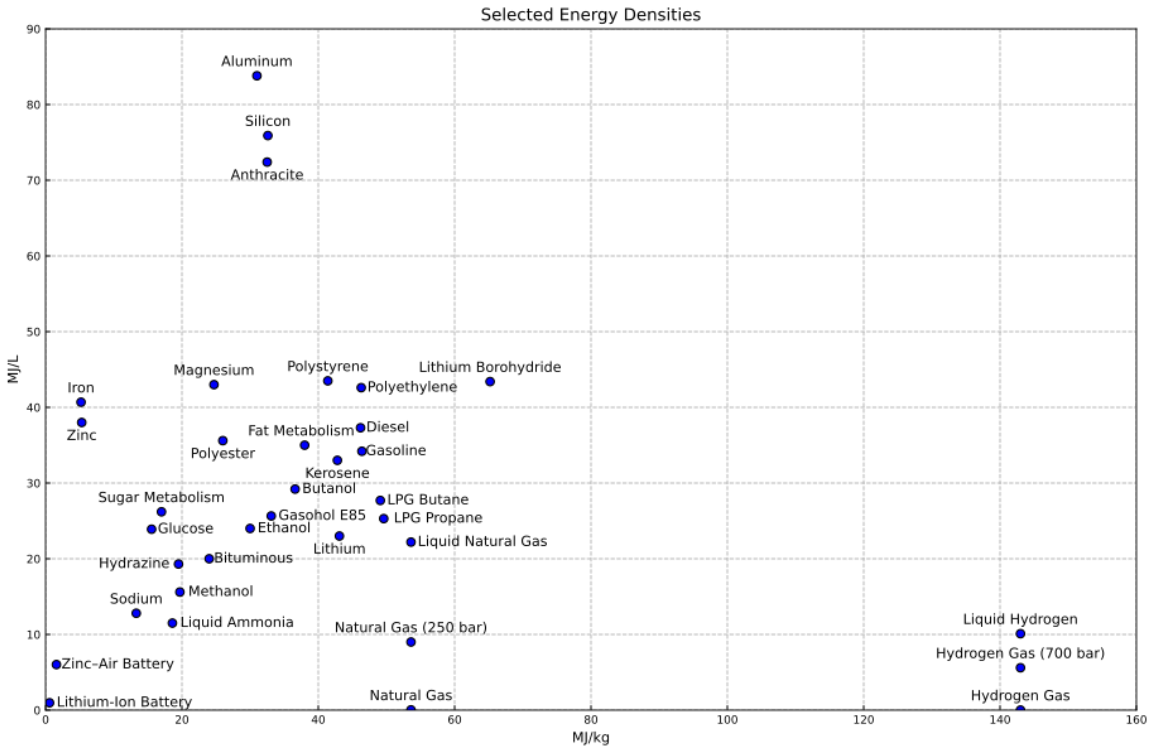


Diagramme présentant les capacités comparées de stockage d'énergie en volume et en masse

[source : Scott Dial, Wikimedia Commons (domaine public)]

C-Etude d'une pile à combustible au méthanol

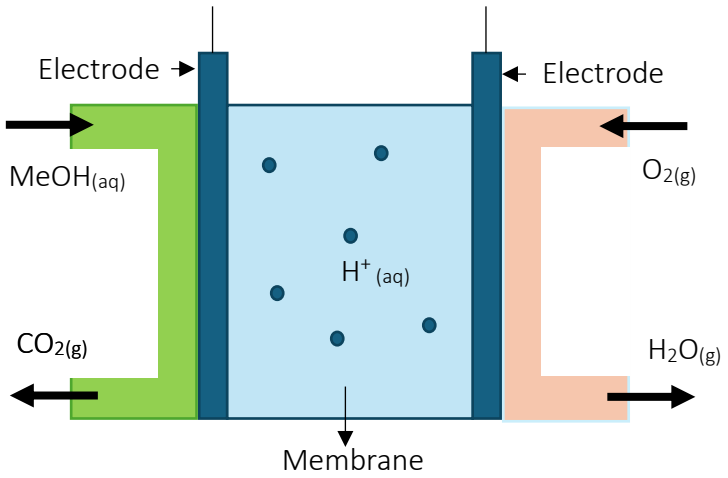
Source : Claude LAMY, Michel CASSIR, Daniel HISSEL, Gilles TAILLADES. Principe des piles à combustible - Piles à membranes basse température [en ligne]. In : Techniques de l'ingénieur. Référence D3340 V2 Paris : Techniques de l'ingénieur, 2023.

Le but de cette partie est de développer une utilisation de l'énergie chimique obtenue à partir du CO_2 (stockée ici sous forme de méthanol) pour produire de l'électricité. Pour cela, la piste de la pile à combustible au méthanol avec un rendement énergétique en conditions réversibles (équilibre) proche de 100% est privilégiée à celle utilisant un moteur thermique couplé à un alternateur pour lequel ce rendement ne dépasse pas 45%.

L'étude porte sur une pile à oxydation directe du méthanol (DMFC : direct methanol fuel cell) constituée de 2 compartiments séparés par une membrane échangeuse de protons qui joue à la fois le rôle de milieu acide et de séparateur.

a) Les couples mis en jeu présentent les potentiels standards suivants : $E^{\circ}_{CO_2/CH_3OH}$= 0,02V $E^{\circ}_{O_2/H_2O}$= 1,23V (298K)

En déduire les demi réactions à chaque électrode, écrites dans le sens de fonctionnement de la pile ainsi que la réaction d'oxydoréduction globale de fonctionnement.



La pile au méthanol

b) Compléter le dessin de cette pile avec la nature (anode, cathode), la polarité des électrodes ainsi que le sens de circulation des porteurs de charge. On peut noter que, le méthanol réémet la molécule de CO_2 dont il était issu.

c) Les électrodes sont souvent à base de platine (recouvert d'un dépôt catalytique pour augmenter la cinétique des réactions aux électrodes). Pourquoi le platine ?

d) A quoi sert la membrane échangeuse de protons dans la pile au méthanol ?

e) Ecrire la formule de Nernst à chaque électrode en notant $a_{(CH3OH)}$ l'activité du méthanol et en remplaçant les activités des gaz par leur pression partielle et l'activité de l'eau par 1. En déduire la constante d'équilibre de la réaction de fonctionnement de la pile.

f) Quelle masse de méthanol est nécessaire au fonctionnement journalier d'une pile débitant en moyenne un courant de 100 mA?

g) La densité du méthanol à 25°C vaut 0,792. Calculer la densité d'énergie volumétrique (MJ/L) et gravimétrique (MJ/kg) en admettant que l'énergie chimique transformée en énergie électrique dans la pile vaut dans les conditions standard **$n.F.(E°_a-E°_c)$** avec :

- n le nombre de moles d'électrons échangés
- F le Faraday : charge d'une mole d'électrons (montrer que F ≈ 96500 C)
- E° les potentiels standard l'anode et à la cathode (Conseil : travailler sur une mole de méthanol)

h) Placer le méthanol de la pile DMFC sur le graphique des densités d'énergie. Expliquer sa très grande densité d'énergie volumétrique comparée à celle de la pile à hydrogène. Dans les principales applications actuelles ou à venir, la DMFC est utilisée comme source d'énergie externe pour recharger une batterie dans des applications mobiles.

i) Après une utilisation prolongée des piles, le taux de conversion du méthanol en CO_2 est de l'ordre de 95%. Le reste étant constitué d'acide méthanoïque et de traces de méthanal. Ecrire la demi-équation d'oxydation du CO_2 en acide méthanoïque. Quelle est la conséquence sur la quantité d'électricité produite ?

j) Un autre problème des DMFC est lié à la perméabilité de la membrane à la traversée du méthanol. Quelle est la conséquence de ce problème ?

Ce TD a été mutualisé dans le cadre d'un partenariat entre le Groupe INSA et la Fondation UVED pour la déclinaison disciplinaire de l'enseignement des enjeux de transition écologique et sociétale (TEDS).

Il est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons- 4.0 International : Attribution- Pas d'Utilisation Commerciale- Partage dans les Mêmes Conditions

Pour la formation continue ou professionnelle, les modalités d'usage sont à déterminer avec UVED et doivent faire l'objet d'un contrat définissant les conditions d'usage et de commercialisation. Contact : contact@fondation-uved.fr

Première édition : juillet 2025