

NOM Prénom :

Examen final ER50 (2026)

Aucun document ne sera autorisé sauf une feuille manuscrite de format A4 - recto/verso ainsi qu'une calculatrice (sans mémoire).

Partie « Systèmes à pile à combustible PEMFC basse température » (note / 10)

- Questions Q1 à Q15 (note / 7.5 ; avec 0.5 point par question ; plusieurs réponses possibles) :

QCM - Q1/15 - Parmi les secteurs suivants, lesquels constituent aujourd'hui les cibles prioritaires du déploiement de l'hydrogène (H₂) décarboné en France ?

- ☐ La décarbonation des procédés industriels fortement consommateurs d'H₂ et les transports lourds.
- ☐ Le chauffage résidentiel individuel.
- ☐ Le déploiement à grande échelle des véhicules particuliers.

QCM - Q2/15 - Pour un véhicule léger de tourisme (segments B-C ou catégorie M1) propulsé par une pile à combustible PEMFC, quelle est la consommation moyenne d'H₂ sur un cycle de conduite représentatif, à état de charge constant de la batterie hybridant le système PEMFC ?

- ☐ Environ 1 kg d'H₂ pour 100 km.
- ☐ Environ 10 kg d'H₂ pour 100 km.

QCM - Q3/15 - Parmi les approches suivantes, laquelle fournit l'évaluation la plus exhaustive des impacts environnementaux associés à un véhicule à pile à combustible PEMFC ?

- ☐ Le rendement de la chaîne énergétique "well-to-wheel" (du puits à la roue), qui prend en compte la production du combustible et son utilisation dans le véhicule.
- ☐ Le rendement de la chaîne de traction "tank-to-wheel" (du réservoir à la roue), qui caractérise uniquement l'efficacité énergétique du véhicule en phase d'utilisation.
- ☐ L'impact environnemental évalué sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule selon une approche d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) "cradle-to-grave" (du berceau à la tombe), incluant la fabrication, l'utilisation et la fin de vie.

QCM - Q4/15 - Par rapport au méthane, l'H₂ présente une plage d'inflammabilité plus large et une énergie minimale d'inflammation plus faible, ce qui constitue un enjeu important pour la sécurité des systèmes de stockage et d'utilisation de l'H₂.

- ☐ Vrai.
- ☐ Faux.

QCM - Q5/15 - Associez par un trait chaque élément d'une PEMFC à sa fonction principale :

Eléments constitutifs d'une PEMFC		Fonctions
A. Membrane polymère échangeuse de protons (PEM)	•	• 1. Assurer la diffusion des réactifs vers les sites catalytiques et l'évacuation de l'eau produite.
B. Couches catalytiques	•	• 2. Distribuer les gaz réactifs dans la cellule et collecter le courant électrique.
C. Couche de diffusion des gaz (GDL)	•	• 3. Permettre le transport des protons de l'anode vers la cathode tout en empêchant le mélange direct des réactifs.
D. Plaque bipolaire	•	• 4. Accélérer les réactions électrochimiques d'oxydation de l'H ₂ et de réduction de l'O ₂ .

QCM - Q6/15 - Parmi les verrous technico-économiques suivants, lesquels constituent aujourd'hui des enjeux majeurs pour le déploiement à grande échelle des stacks de PEMFC basse température ?

- ☐ Réduire la quantité de platine (ou d'autres métaux nobles) utilisée dans les couches catalytiques.
- ☐ Améliorer la durée de vie et la résistance au vieillissement des cellules et des matériaux constitutifs.
- ☐ Réduire les coûts de fabrication des composants du cœur de pile (MEA, GDL) et des plaques bipolaires.
- ☐ Diminuer la quantité de lithium utilisée dans les assemblages de cellules PEMFC.
- ☐ Simplifier l'intégration et la fabrication des stacks à grande échelle.

QCM - Q7/15 - Dans une PEMFC, les couches de diffusion des gaz (GDL) sont des matériaux poreux généralement à base de carbone, situés entre les couches catalytiques et les plaques bipolaires. Elles assurent notamment la distribution des réactifs, la collecte du courant électrique et la gestion de l'eau dans la cellule. Une couche microporeuse (MPL) peut être ajoutée entre la GDL et la couche catalytique.

- ☐ Vrai.
- ☐ Faux.

QCM - Q8/15 - Une membrane PEM de type Nafion® doit assurer efficacement le transport des protons tout en bloquant le passage des électrons et en limitant la perméation ("crossover") des gaz réactifs. Elle doit également conserver ses propriétés malgré les sollicitations mécaniques, chimiques et thermiques subies en fonctionnement. Le Nafion® étant un polymère perfluoré (PFAS), le développement de membranes alternatives plus durables constitue un axe important de recherche.

- ☐ Vrai.
- ☐ Faux.

QCM - Q9/15 - Dans une pile à combustible PEMFC, la tension en charge est inférieure à la tension à circuit ouvert (OCV) en raison de différentes surtensions électrochimiques. Parmi les propositions suivantes, lesquelles contribuent à ces pertes de tension ?

- ☐ Surtensions d'activation, liées à la cinétique des réactions d'oxydo-réduction aux électrodes.
- ☐ Pertes ohmiques, liées notamment à la résistance de la membrane protonique, à son état d'hydratation et aux résistances de contact entre composants.
- ☐ Pertes de diffusion (ou de concentration), liées aux limitations de transport des réactifs dans les couches de diffusion (GDL) et les canaux d'alimentation.
- ☐ Pertes liées au crossover des réactifs dans la membrane et à des réactions parasites aux électrodes.
- ☐ Pertes liées à la formation de dendrites dans des électrodes de lithium utilisées dans les PEMFC.

QCM - Q10/15 - La courbe de polarisation d'une PEMFC peut être modélisée de manière semi-empirique par la relation suivante : $U = E_{OCV} - A \times \ln(I / I_0) - (R \times I) - B \times \ln(1 - I / I_l)$

A quel type de pertes le terme $B \times \ln(1 - I / I_l)$ est-il associé ?

- ☐ Pertes d'activation (cinétique électrochimique aux électrodes).
- ☐ Pertes de transport de matière (ou pertes de concentration / diffusion), notamment à fort courant, lorsque le courant approche le courant limite.

QCM - Q11/15 - Dans le plan de Nyquist ($x=Re(Z), y=-Im(Z)$) orthonormé : l'impédance d'un circuit RC parallèle est représentée par un arc de cercle. Lorsqu'une résistance est ajoutée en série avec ce dipôle, la représentation de Nyquist est simplement translatée vers la droite selon l'axe des x.

- ☐ Vrai.
- ☐ Faux.

QCM - Q12/15 - Dans un système à pile à combustible PEMFC (application stationnaire ou mobile), l'alimentation en H₂ du compartiment anodique peut être assurée selon différents modes de fonctionnement. Parmi les propositions suivantes, lesquelles sont correctes ?

- ☐ Fonctionnement en mode "dead-end" (anode fermée / mode bouché), avec évacuation périodique des gaz inertes et de l'eau par des opérations de purge.
- ☐ Fonctionnement en mode recirculation, où l'H₂ non consommé en sortie d'anode est réinjecté en amont de la pile à l'aide d'un dispositif de recirculation (pompe, soufflante ou éjecteur).

QCM - Q13/15 - Dans un système à pile à combustible PEMFC, le circuit d'alimentation en air du compartiment cathodique peut intégrer les équipements suivants. Parmi les propositions suivantes, lesquelles sont correctes ?

- ☐ Un système de compression d'air (compresseur ou soufflante) permettant d'assurer le débit d'air et l'apport en oxygène à la cathode.
- ☐ Un dispositif d'humidification de l'air en amont du stack afin de limiter le dessèchement de la membrane polymère.
- ☐ Une vanne de contre-pression ou déverseur ("back-pressure valve") en sortie de stack permettant de réguler la pression dans le compartiment cathodique.

QCM - Q14/15 - Le choix entre un refroidissement par air et un refroidissement par liquide dans une PEMFC dépend principalement de la puissance dissipée et des contraintes de gestion thermique, les systèmes de plus forte puissance nécessitant généralement un refroidissement liquide pour assurer une meilleure homogénéité de température.

- ☐ Vrai. ☐ Faux.

QCM - Q15/15 - Un convertisseur statique de type élévateur de tension (convertisseur DC/DC boost), non réversible en puissance, peut être utilisé pour le conditionnement de l'énergie électrique issue d'une pile à combustible PEMFC. Il permet notamment de réguler le courant du stack et d'adapter la tension de la pile à celle d'un bus continu ou d'un réseau de tension plus élevée.

- ☐ Vrai. ☐ Faux.

- Exercice avec 5 questions (note / 2.5) :

Soit un stack de pile à combustible PEMFC constitué de 50 cellules identiques fonctionnant en régime stationnaire. Chaque cellule est parcourue par un courant de 100 A et présente une tension moyenne de 0.7 V. On considère une tension réversible théorique maximale de la cellule égale 1.23 V.

Exercice - Q1/5 (0.5 point) - Déterminer la puissance électrique délivrée par le stack en [W].

Exercice - Q2/5 (0.5 point) - Estimer la puissance thermique en [W] dissipée par le stack au point de fonctionnement considéré.

Exercice - Q3/5 (0.5 point) - Déterminer le débit molaire d'hydrogène consommé par le stack en [mol/s] :

Exercice - Q4/5 (0.5 point) - Déterminer le débit molaire d'oxygène consommé par le stack en [mol/s] :

Exercice - Q5/5 (0.5 point) - En considérant un fonctionnement avec un excès d'air cathodique (facteur de sur-stœchiométrie égal à 2) et une teneur en dioxygène dans l'air de 21 %, déterminer le débit massique d'air à fournir au stack en [g/s].