



**Vendredi 13/03/2026**

**ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE MPI**

---

**PHYSIQUE - CHIMIE**

**Durée : 4 heures**

---

*N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.*

**RAPPEL DES CONSIGNES**

- Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, bleu clair ou turquoise, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.
  - Ne pas utiliser de correcteur.
  - Écrire le mot *FIN* à la fin de votre composition.
- 

**Les calculatrices sont autorisées**

**Le sujet est composé de quatre problèmes totalement indépendants.  
La plupart des sous-parties le sont également.**

## Problème 1 : Le synchrotron Soleil

Un synchrotron est un instrument électromagnétique de grande taille destiné à l'accélération de particules chargées.

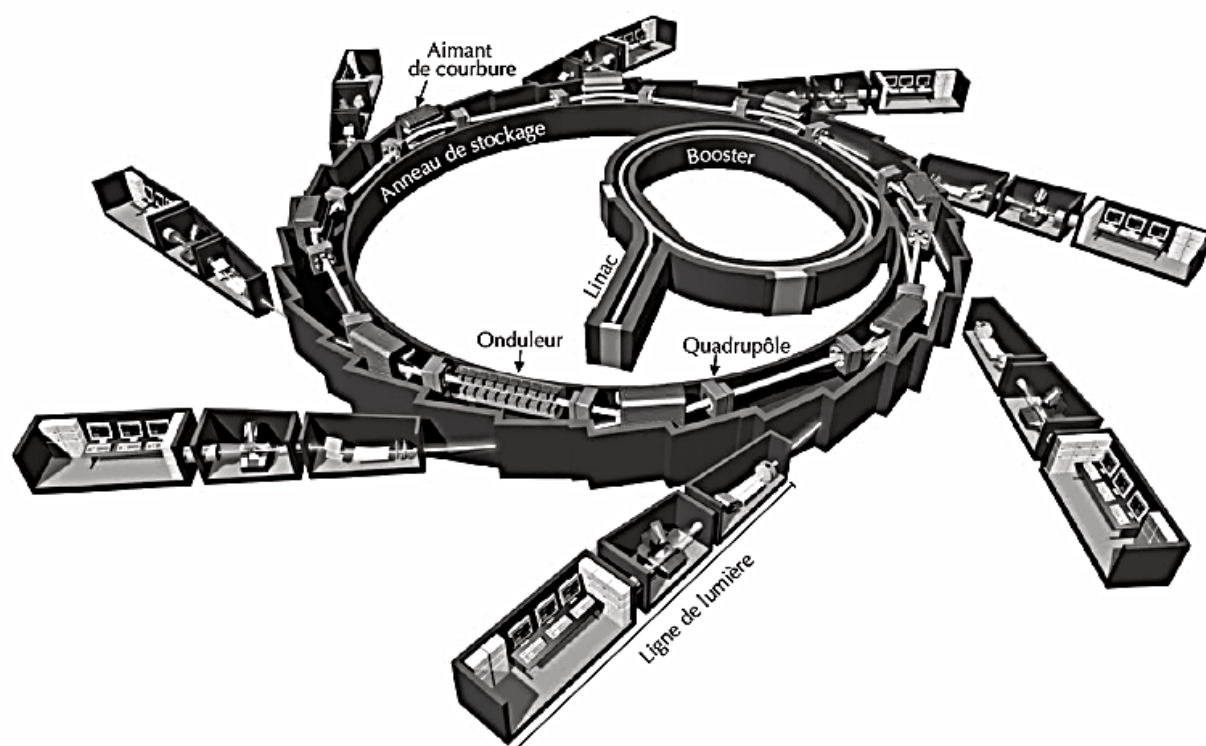
Le rayonnement synchrotron est un rayonnement électromagnétique émis par une particule chargée possédant une accélération. Ce rayonnement est utilisé pour des analyses physiques.

Dans le synchrotron SOLEIL, situé à Saclay, des électrons, de masse notée  $m_e$  et de charge  $-e$ , accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière, sont déviés par des champs magnétiques.

Le problème étudie quelques ordres de grandeurs liés au synchrotron SOLEIL.

Il est constitué de 6 parties qui peuvent être résolues de manière indépendante les unes des autres. Après la partie I qui traite de généralités, la partie II étudie la déviation des électrons, la partie III le rayonnement émis, la partie IV la directivité et le spectre du rayonnement, la partie V le principe de la spectrométrie par transformée de Fourier et la partie VI une application en spectrométrie.

Le schéma général du synchrotron SOLEIL est rapporté **figure 1**.



**Figure 1** - Schéma général du synchrotron SOLEIL (d'après *Reflets de la Physique* n° 34-35)

### Données

|                                    |                                                                        |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Vitesse de la lumière dans le vide | $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$                     |
| Masse de l'électron                | $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 5,1 \cdot 10^2 \text{ keV}/c^2$ |
| Charge élémentaire                 | $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$                                     |
| Valeur de l'électron-volt          | $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$                          |
| Constante de Planck                | $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$                      |
| Constante d'Avogadro               | $N_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$                             |

Bien que ces données soient fournies avec plusieurs chiffres significatifs, les résultats numériques seront fournis, sauf indication contraire, avec UN SEUL chiffre significatif.

## Partie I - Généralités

Des électrons non-relativistes, émis sans vitesse initiale sont accélérés linéairement par un champ électrostatique uniforme et unidirectionnel  $\vec{E} = E \vec{e}_x$ .

- Q1.** Rappeler la relation qui lie le champ électrostatique au potentiel électrostatique  $V$ . En déduire l'énergie potentielle électrostatique de l'électron en fonction de  $e$  et de  $V$ .
- Q2.** Calculer la différence de potentiel nécessaire pour obtenir une énergie cinétique finale  $E_c = 1,0$  keV. Justifier.
- Q3.** Dans la zone nommée Linac du synchrotron SOLEIL (**figure 1**), les électrons sont accélérés jusqu'à une énergie cinétique  $E_c = 100$  MeV. Vérifier que leur vitesse  $v$  ne peut plus alors être calculée à l'aide de la forme de l'énergie cinétique utilisée en mécanique classique.
- Q4.** Les électrons étant relativistes, leur énergie cinétique s'écrit :

$$E_c = (\gamma - 1)m_e c^2$$

où  $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$  est le facteur de Lorentz de l'électron. Calculer ce facteur.

Les électrons sont ensuite accélérés jusqu'à  $E_c = 2,7$  GeV grâce à un autre accélérateur nommé booster, puis libérés dans l'anneau de stockage. Leur vitesse est alors assimilable à celle de la lumière.

- Q5.** L'intensité du courant circulant dans l'anneau de stockage, assimilé à un cercle de rayon  $R = 57$  m, vaut à un instant donné  $i = 0,43$  A. Exprimer, puis calculer le nombre d'électrons  $N$  constituant le faisceau.

## Partie II - Éléments magnétiques

L'anneau de stockage n'est pas rigoureusement circulaire : il est constitué de portions linéaires et d'éléments magnétiques qui sont des dipôles, des quadripôles et des sextupôles.

- Q6.** Expliquer comment on peut mesurer un champ magnétique au laboratoire.

Les dipôles sont des aimants servant à courber la trajectoire des électrons. On considère une base cartésienne  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . Un dipôle crée un champ magnétique vertical supposé uniforme et stationnaire  $\vec{B} = B_0 \vec{e}_y$ , avec  $B_0 > 0$ .

- Q7.** On considère un électron non relativiste pénétrant avec une vitesse  $\vec{v} = v_0 \vec{e}_z$ , avec  $v_0 > 0$ , dans une zone où règne le champ magnétique  $\vec{B} = B_0 \vec{e}_y$ . En admettant que la trajectoire est circulaire de rayon  $R_B$ , montrer que :

$$B_0 = \frac{p}{eR_B} \quad (1)$$

où  $p$  est la norme de la quantité de mouvement de l'électron.

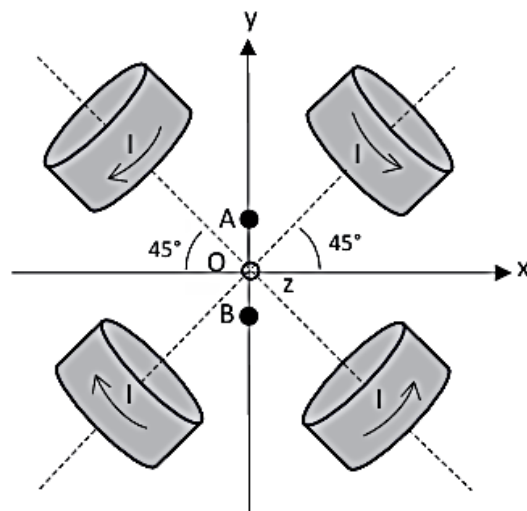
Exprimer la pulsation de rotation  $\omega_B$  de l'électron sur sa trajectoire.

- Q8.** La relation (1) reste valable dans le cadre de la relativité restreinte, avec une norme de la quantité de mouvement voisine de  $p \approx \frac{E_c}{c}$ . Calculer la valeur du champ magnétique permettant d'obtenir un rayon  $R_B = 5,4$  m pour la trajectoire. On rappelle que dans l'anneau de stockage  $E_c = 2,7$  GeV.

Les inhomogénéités de vitesse du paquet d'électrons entraînent une divergence du faisceau d'électrons, qui doit donc être focalisé. On utilise pour cela des quadrupôles, composés de quatre bobines disposées en carré (figure 2).



**Figure 2a)** Quadrupôle, d'après Reflets de la physique n° 34



**Figure 2b)** Schématisation des distributions de courants (en pointillés les axes des bobines ; les flèches donnent le sens des courants)

- Q9.** Expliquer pourquoi le champ en un point du plan  $xOy$  de la figure 2b est contenu dans ce plan. Donner la direction et le sens du champ au voisinage de l'origine :

- sur l'axe  $Ox$  ;
- sur l'axe  $Oy$ .

Donner la valeur du champ à l'origine des coordonnées. On justifiera les réponses.

Le champ magnétique créé par les quatre bobines peut s'écrire au voisinage de l'origine :

$$\vec{B} = (Ky + K')\vec{e}_x + (Kx + K')\vec{e}_y \text{ avec } K \text{ et } K' \text{ constantes.}$$

- Q10.** Rappeler les deux équations locales vérifiées par le champ magnétique en régime stationnaire et montrer que le champ proposé vérifie ces équations. Donner la valeur de  $K'$ .

- Q11.** On suppose  $K > 0$ . On considère un faisceau d'électrons de vitesse  $\vec{v} = v_0 \vec{e}_z$  avec  $v_0 > 0$ , possédant une faible extension  $\Delta y$  autour de l'origine. Sur un schéma, dessiner le champ magnétique et la force exercée sur un électron aux points  $A(0, \Delta y/2, 0)$  et  $B(0, -\Delta y/2, 0)$  (figure 2b). En déduire que le faisceau est refocalisé au voisinage de l'origine grâce au quadrupôle.

- Q12.** Montrer qu'un faisceau d'électrons possédant une extension  $\Delta x$  autour de l'origine sera cette fois défocalisé. Expliquer comment on peut disposer deux quadrupôles successifs pour pallier cet inconvénient.

Le dispositif magnétique est complété par un sextupôle non étudié servant à corriger la trajectoire du faisceau électronique.

### Partie III - Rayonnement

Des charges accélérées rayonnent une onde électromagnétique. Dans le cas du synchrotron SOLEIL, ce rayonnement est appelé « rayonnement synchrotron ».

**Q13.** Le rayonnement synchrotron est anisotrope et polarisé. Définir ces 2 mots.

Avant de s'intéresser au rayonnement émis par un électron accéléré, on va retrouver les principales caractéristiques du rayonnement d'accélération dans un cas simple : le rayonnement dipolaire électrique.

On considère une charge fixe  $+e$  placée à l'origine  $O$  des coordonnées et un électron de charge  $-e$  en un point  $P$ , dont le mouvement avec le temps  $t$  s'écrit :

$$\overline{OP}(t) = l \cos(\omega t) \overline{e_z} \text{ avec } l \text{ et } \omega \text{ des constantes positives.}$$

On observe le champ à une distance  $r = OM$  grande devant  $l$ . On adopte donc les coordonnées sphériques  $r, \theta$  et  $\varphi$  associées aux vecteurs unitaires  $\overline{e_r}, \overline{e_\theta}, \overline{e_\varphi}$  (figure 3).

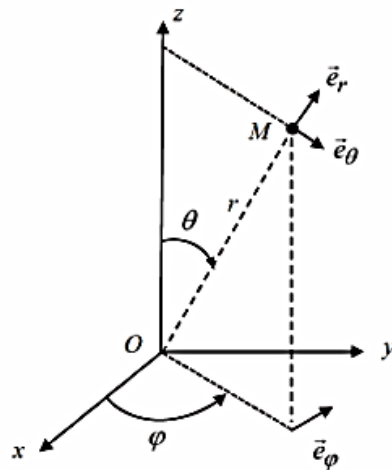


Figure 3 - Coordonnées sphériques

**Q14.** Justifier que les composantes  $E_\varphi$ ,  $B_r$  et  $B_\theta$  sont nulles. Justifier ensuite que les composantes non nulles des champs émis ne dépendent pas de  $\varphi$ .

**Q15.** Exprimer l'accélération  $\vec{a}$  de l'électron. Définir le moment dipolaire  $\vec{p}_0$  associé à la distribution de charges et donner son amplitude  $p_0$  en fonction de  $e$ ,  $\omega$  et de  $a = \|\vec{a}\|$ .

Les champs électrique et magnétique dans la zone de rayonnement s'écrivent :

$$\vec{E} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega^2 \sin \theta}{4\pi r} \cos\left(\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \overline{e_\theta}$$

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega^2 \sin \theta}{4\pi r c} \cos\left(\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \overline{e_\varphi}.$$

- Q16.** Définir la zone de rayonnement et justifier le terme  $r/c$  apparaissant dans l'argument du cosinus.
- Q17.** Montrer que l'onde a localement une structure d'onde plane. Qualifier la polarisation de l'onde. Vérifier l'homogénéité des champs.
- Q18.** Définir et exprimer le vecteur de Poynting associé à l'onde émise. Déterminer dans quelle direction la puissance surfacique émise est maximale et exprimer la norme de la valeur moyenne du vecteur de Poynting dans cette direction.

Dans le cas d'un électron relativiste rayonnant dans le synchrotron sur une trajectoire circulaire, la valeur moyenne du vecteur de Poynting dans la direction d'observation  $\overrightarrow{OM} = r \overrightarrow{e_r}$  est :

$$\langle \overrightarrow{\pi}_{relat} \rangle \approx \frac{e^2 a^2}{32 \pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)^4} \overrightarrow{e_r}$$

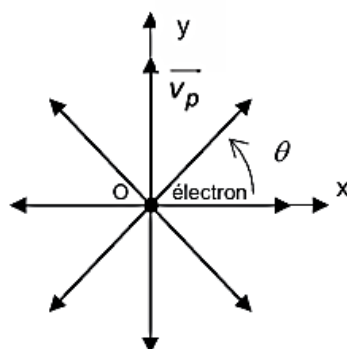
où  $\theta$  est l'angle entre le vecteur vitesse  $\overrightarrow{v}$  de l'électron et le vecteur  $\overrightarrow{e_r}$ ,  $v$  le module de la vitesse de l'électron et  $a$  le module de l'accélération de l'électron.

- Q19.** Donner la direction dans laquelle la puissance surfacique moyenne émise est maximale. Comparer alors qualitativement la valeur maximale de la norme de la moyenne du vecteur de Poynting dans le cas du rayonnement synchrotron et dans le cas du rayonnement dipolaire électrique. Commenter.

## Partie IV - Directivité du rayonnement synchrotron

Les résultats précédents ont montré que le rayonnement est très intense dans une direction privilégiée, ce qui est dû à la très forte anisotropie du vecteur de Poynting. On s'intéresse dans cette partie à un modèle particulière visant à expliquer la directivité du rayonnement synchrotron.

On considère un électron se déplaçant à vitesse  $\overrightarrow{v} = v \overrightarrow{e_x}$  par rapport à un référentiel  $\mathcal{R}'$ . Dans le référentiel  $\mathcal{R}$  lié à l'électron, celui-ci émet des particules de manière isotrope dans le plan  $xOy$  (figure 4). La moitié des particules est donc émise dans le demi-espace  $x > 0$ .



**Figure 4** - Particules émises par un électron dans le référentiel  $\mathcal{R}$

**Q20.** On suppose que la règle de composition des vitesses est la règle de composition galiléenne. Exprimer et représenter la vitesse  $\vec{v}'_p$  (par rapport à  $\mathcal{R}'$ ) de la particule émise dans  $\mathcal{R}$  à la vitesse  $\vec{v}_p$  avec l'angle  $\theta = \pi/2$  (**figure 4**). En déduire l'angle  $\theta'$  formé par  $\vec{v}'_p$  avec l'axe Ox en fonction de  $v$  et de  $v_p = \|\vec{v}_p\|$ . Donner la proportion des particules émises dans le cône de demi-angle  $\theta'$  par rapport à  $\mathcal{R}'$ .

**Q21.** Le calcul précédent permet de comprendre qualitativement l'anisotropie du rayonnement lorsque les particules émises sont des photons, mais ne peut être exact. Expliquer pourquoi.

Les formules de transformation des vitesses dans la relativité restreinte s'écrivent :

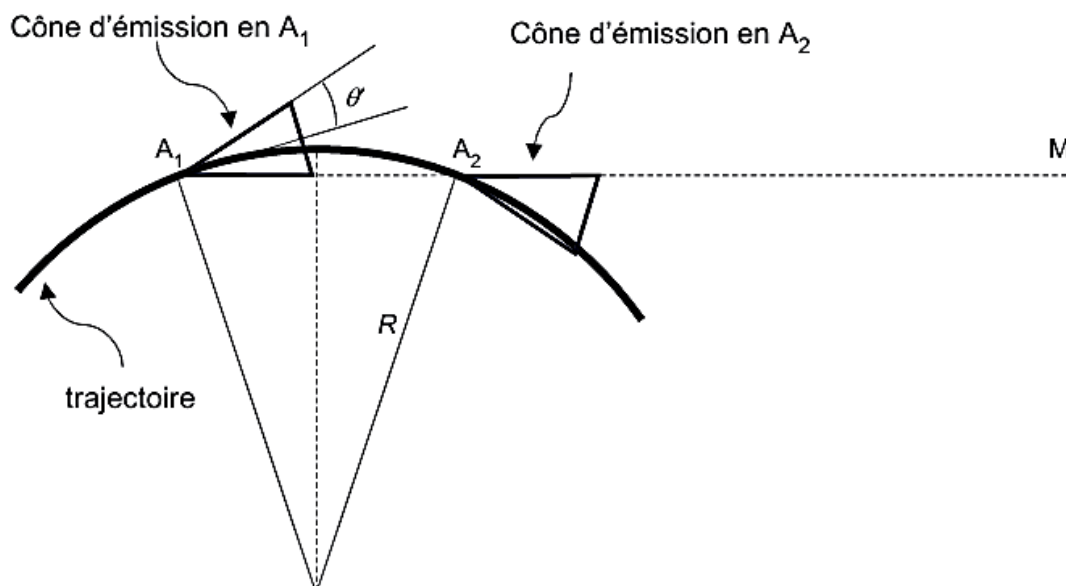
$$v'_{p\parallel} = \frac{v_{p\parallel} + v}{1 + \frac{v v_{p\parallel}}{c^2}} ; \quad v'_{p\perp} = \frac{v_{p\perp}}{\gamma \left( 1 + \frac{v v_{p\parallel}}{c^2} \right)}$$

où  $v_{p\parallel}$  (resp.  $v_{p\perp}$ ) est la composante de vitesse parallèle (resp. perpendiculaire) à  $\vec{v}$  et

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ le facteur de Lorentz de l'électron.}$$

**Q22.** En déduire que pour un électron ultrarelativiste du synchrotron, le demi-angle  $\theta'$  à l'intérieur duquel est émis la moitié du rayonnement est tel que  $\theta' \approx \frac{1}{\gamma}$ . Calculer  $\theta'$  pour  $\gamma = 5,0 \cdot 10^4$ . Conclure.

En raison de la faible ouverture du faisceau, un observateur placé en M ne perçoit le rayonnement émis que sur une fraction  $A_1A_2$  de la trajectoire (**figure 5**).



**Figure 5 - Perception du rayonnement par un observateur M**

**Q23.** Exprimer la longueur de cette fraction de trajectoire en fonction du rayon  $R$  et de  $\theta'$ .

- Q24.** Soient  $t_1$  et  $t_2$  les instants auxquels l'électron, de vitesse  $v$  proche de  $c$ , passe en  $A_1$  et  $A_2$ , mesurés dans le référentiel de l'observateur. Exprimer les instants  $t'_1$  et  $t'_2$  auxquels l'observateur reçoit les signaux émis en  $A_1$  et  $A_2$  et en déduire que, pour l'observateur, la durée du signal reçu vaut, avec  $\tan \theta' \approx \theta' \approx \frac{1}{\gamma}$  :

$$\Delta t = \frac{2R}{\gamma v} \left( 1 - \frac{v}{c} \right).$$

Montrer que :

$$\Delta t \approx \frac{R}{c\gamma^3}.$$

- Q25.** On admet que la fréquence associée à  $\Delta t$  constitue la fréquence supérieure  $f_{max}$  du spectre émis. Calculer  $f_{max}$  pour  $R = 57 \text{ m}$  et  $\gamma = 5,0 \cdot 10^4$ . Citer le domaine du spectre électromagnétique auquel appartient le rayonnement émis à cette fréquence.

## Problème 2 : Quelques aspects de l'industrie nucléaire

Le dénouement de la COP26 à Glasgow a été marqué par l'intervention de l'Inde pour demander non plus une sortie du charbon mais une réduction de l'émission des gaz à effet de serre. Dans son allocution télévisée en date du mardi 9 Novembre 2021, le Président de la République Française, Emmanuel Macron, a annoncé la relance de la construction de réacteurs nucléaires. C'est une annonce majeure pour le domaine de l'énergie, le recours aux énergies fossiles s'en trouvant grandement limité.

L'objet de ce problème est d'aborder trois points de l'industrie nucléaire : le principe de fonctionnement d'une centrale puis celui d'un alternateur et le retraitement des déchets radioactifs.

Les questions libellées par une astérisque (\*) demandent de l'initiative de la part des candidates et candidats.

### Notations et valeurs numériques

|                                                                |                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Conversion .....                                               | $1,0 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$                            |
| Période radioactive associée au processus de fission (4) ..... | $T_{1/2, \text{moy}} \sim 1 \cdot 10^1 \text{ s}$                          |
| Constante des gaz parfaits .....                               | $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$            |
| Constante d'Avogadro .....                                     | $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$                                |
| Masse molaire de l'uranium .....                               | $M_{235\text{U}} = 235,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$                  |
| Masse volumique de l'eau liquide .....                         | $\rho_e = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                  |
| Capacité thermique massique de l'eau liquide .....             | $c_e = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| Conductivité thermique de l'argile .....                       | $\lambda_a = 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$        |
| Masse volumique de l'argile .....                              | $\rho_a = 1,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                   |
| Capacité thermique massique de l'argile .....                  | $c_a = 7 \cdot 10^2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$    |

### Partie I. Centrale nucléaire

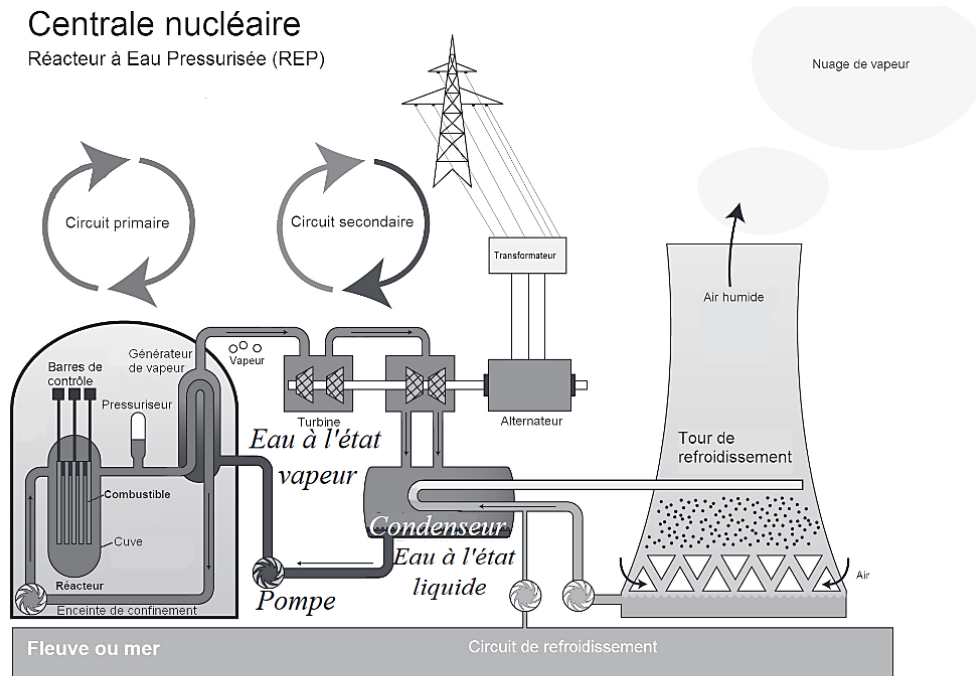
Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire est représenté **figure 7**. Le réacteur chauffe une certaine quantité d'eau qui circule, en boucle fermée, dans le circuit primaire. Cette eau permet de vaporiser l'eau contenue dans le circuit secondaire et dont la circulation assure la rotation de turbines couplées à des alternateurs. Le circuit tertiaire est utilisé pour liquéfier l'eau du circuit secondaire en sortie des turbines, avant qu'elle ne soit à nouveau injectée dans les générateurs de vapeur.

Une centrale nucléaire peut être vue comme une machine ditherme fonctionnant entre deux sources de chaleur :

- une source chaude (eau du circuit primaire) de température  $T_C = 573 \text{ K}$  ;
- une source froide (eau de la Moselle) de température moyenne annuelle  $T_F = 287 \text{ K}$ .

**Q30.** Calculer le rendement  $\eta$  de la centrale sachant qu'il est égal à 60,0 % du rendement maximal de Carnot. Vous établirez tout d'abord l'expression du rendement de Carnot.

**Q31.** Exprimer la puissance thermique  $\mathcal{P}_{\text{th}, C}$  reçue de la source chaude vers le fluide caloporteur en fonction de  $\eta$  et  $\mathcal{P}$ , puissance mécanique algébriquement reçue.



**FIGURE 7** – Principe d'une centrale nucléaire (source : Wikipedia)

**Q32. (★)** Estimer la variation de température  $\Delta T$  de l'eau de la Moselle due à la présence de la centrale nucléaire de Cattenom. Commenter la valeur obtenue.

**Donnée numérique :**

- Débit volumique annuel moyen de la Moselle :  $D_V = 3,3 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### Document 1 - Centrale nucléaire - Site de Cattenom

Mise en service entre 1986 et 1991, la centrale de Cattenom située dans le département de la Moselle, participe activement au développement du tissu économique de la région. En 2020, les contrats passés avec des entreprises locales ont représenté plus de 35 millions d'euros d'investissement.

#### Une énergie sûre, neutre en $\text{CO}_{2(g)}$

La centrale nucléaire de Cattenom possède 4 réacteurs à eau pressurisée de 1 300 MWe (mégawatt électrique) chacun. En 2020, elle a produit 31,18 TWh d'électricité sans émettre de  $\text{CO}_{2(g)}$ , ce qui couvre les besoins de près de 6,8 millions de foyers français chaque année.

#### La surveillance de l'environnement

Certifiée ISO 14001 depuis 2004, la centrale surveille en permanence son impact sur l'environnement. En 2020, 6 850 prélèvements et 20 774 analyses ont été réalisés pour s'assurer de l'efficacité des démarches environnementales en vigueur.



**FIGURE 8** – Photographie centrale nucléaire de Cattenom au bord de la Moselle

(Source : Document EDF)

## Partie II. Stockage des déchets radioactifs

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en dégageant de l'énergie, pour se transformer en noyaux atomiques stables. L'évolution de la concentration  $C_r(t)$  d'une substance radioactive suit une loi cinétique d'ordre 1 :

$$\frac{dC_r}{dt} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot C_r(t)$$

Avec  $T_{1/2}$  la période (ou demie vie) radioactive du noyau.

$T_{1/2}$  est la durée au bout de laquelle la concentration initiale a été divisée par deux.

Le projet français Cigéo vise à enfouir, sous 500 m de roches argileuses, les déchets nucléaires dits « de moyenne et haute activité à vie longue » ( $T_{1/2} > 31$  a) - soit les plus dangereux - sur un terrain situé à cheval sur les départements de la Meuse et de la Haute-Marne (site de Bure). Afin de préparer ce projet, un laboratoire souterrain a été mis en service sur ce site en 2 000 par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

Les combustibles usés, qui constituent l'essentiel des déchets de haute activité et qui resteront radioactifs des centaines de milliers d'années, sont actuellement entreposés dans les installations d'Orano (ex-Areva) à La Hague (Manche) sous forme de « colis » vitrifiés.

On étudie de manière très simplifiée la possibilité de stocker de tels déchets radioactifs, sous une couche argileuse d'épaisseur  $L = 5,0 \cdot 10^2$  m.

Du fait de la radioactivité des produits de fission, les déchets sont exothermiques. Ils sont vitrifiés dans des colis qui dégagent une puissance  $P_0 = 2,0$  kW dans la première décennie du stockage et décroissante dans le temps.  $N$  colis sont entreposés à 500 m sous la surface. Ils sont uniformément répartis sur une surface  $S$ .

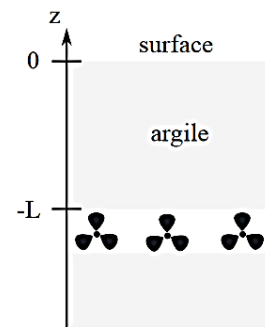


FIGURE 9 – Paramétrage du problème

La température dans l'argile est notée  $T(z, t)$ . L'argile a une masse volumique  $\rho_a$ , une conductivité thermique  $\lambda_a$ , une capacité thermique massique  $c_a$  et une diffusivité thermique  $D_a$ , toutes uniformes. L'épaisseur de la couche dans laquelle seront entreposés les déchets radioactifs est négligeable devant  $L$ .

**Q33.** Citer la loi de Fourier en nommant les différentes grandeurs physiques qui interviennent et en précisant les unités. Quel est son contenu physique ?

**Q34.** En réalisant un bilan d'énergie interne sur une tranche d'argile de surface  $S$  d'épaisseur  $dz$ , montrer que  $T(z, t)$  est solution de l'équation de la diffusion thermique (5) où le coefficient de diffusivité thermique  $D_a$  sera exprimé en fonction de  $\rho_a$ ,  $c_a$  et  $\lambda_a$ . La simplifier dans le cas stationnaire. Préciser l'unité de  $D_a$ .

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (5)$$

**Q35.** Interpréter les deux conditions aux limites suivantes :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-L} = -\frac{N \cdot P_0}{2 \lambda_a \cdot S} \quad \text{et} \quad T(z=0, t) = T_{\text{ext}}. \quad (6)$$

**Q36.** Donner l'expression de  $T(z)$  en régime permanent. Que vaut  $T(-L)$  ?

**Donnée numérique :**

- Température annuelle moyenne de l'atmosphère sur le site de Bure :  $T_{\text{ext}} = 13^\circ\text{C}$ .

**Q37.** La température dans l'argile ne doit pas dépasser  $T_{\max}$  afin que ses propriétés de confinement ne soient pas dégradées. Le stock total de déchets français représente  $N = 3,6 \cdot 10^4$  colis. Estimer la surface  $S$  nécessaire à leur enfouissement, si  $T_{\max} = 100^\circ\text{C}$ .

**Q38.** On envisage d'attendre 30 ans avant d'enfouir les déchets, pendant lesquels ils sont entretenus en surface. Pourquoi ?

On se propose dans la suite de simuler numériquement l'évolution temporelle du champ de température  $(z, t) \mapsto T(z, t)$  de la couche supérieure d'argile au cours du temps.

L'objectif sera donc d'approcher la fonction  $(z, t) \mapsto T(z, t)$ .

### Notations

- $h$  est le pas de la subdivision uniforme  $(t_i)_{i \in \llbracket 0, N_t \rrbracket}$  de l'intervalle de temps  $[0, \Delta t = 3\tau]$  où  $\tau$  est la durée caractéristique de diffusion thermique.

$$t_i = i \cdot h \text{ et } \tilde{T}^i(z) \text{ est l'approximation de } T(z, t_i) \text{ pour } i \in \llbracket 0, N_t \rrbracket$$

- $k$  est le pas de la subdivision uniforme  $(z_n)_{n \in \llbracket 0, N_z \rrbracket}$  de l'intervalle  $[-L, 0]$

$$z_n = n \cdot k \text{ et } \tilde{T}_n(t) \text{ est l'approximation de } T(z_n, t) \text{ pour } n \in \llbracket 0, N_z \rrbracket$$

**En conclusion :**  $\tilde{T}_n^i$  est l'**approximation numérique de la solution**  $T(z = n \cdot k, t = i \cdot h)$  sur un maillage spatial de pas  $k$  et une discrétisation temporelle de pas  $h$ .

**Présentation du schéma numérique explicite centré en espace :**

$$\frac{\tilde{T}_n^{i+1} - \tilde{T}_n^i}{h} = D_a \frac{\tilde{T}_{n+1}^i - 2\tilde{T}_n^i + \tilde{T}_{n-1}^i}{k^2}. \quad (7)$$

**Stabilité du schéma numérique :** le schéma numérique est stable si  $r \leq \frac{1}{2}$  avec  $r = \frac{D_a \cdot h}{k^2}$ .

On propose les lignes de code suivantes. Initialement, le champ de température de l'argile est uniforme de valeur égale à  $T_{\text{ext}}$ .

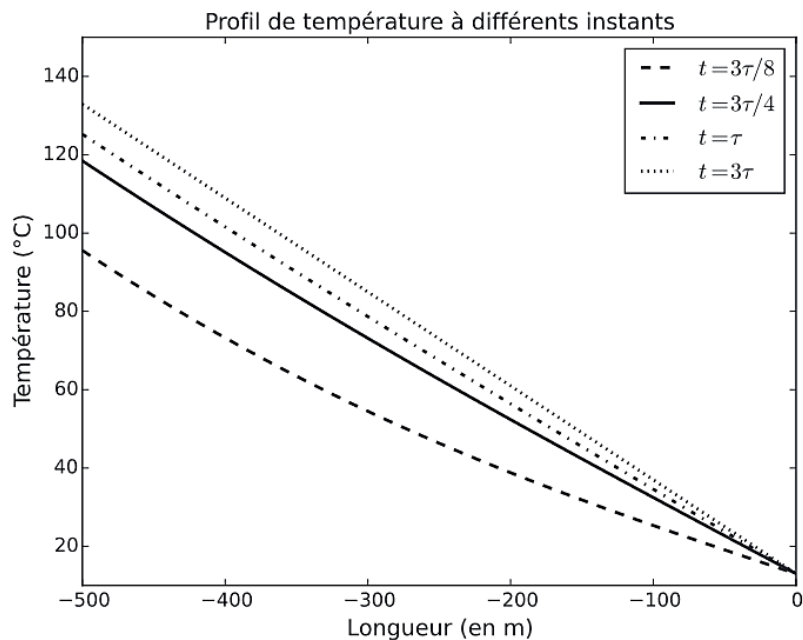
```

1      #Constantes numériques
2  lambda_a, c_a, rho_a = 1.5, 7e2, 1.7e3
3  D_a = ...      #coefficient de diffusivité thermique
4  P0, N, L, S = 2e3, 36000, 5e2, 1e8
5  tau = ...      #temps caractéristique de diffusion thermique
6  Text = 13.
7  Nt, Nx = 30000, 50
8  h = ...      #pas discrétisation temporelle
9  k = ...      #pas discrétisation spatiale
10     #coefficient r
11  r = D_a * h / k**2
12  assert(r < 0.5)
13     #initialisation champ température
14  T = [[Text for j in range(Nx)] for i in range(Nt)]
15  T[0][0] = T[0][1] + N * P0 / (2 * lambda_a * S) * k
16     #Schéma numérique explicite
17  for t in range(Nt - 1):
18     for x in range(1, Nx - 1):
19         T[t + 1][x] = T[t][x] + ...
20     T[t+1][0] = T[t+1][1] + N * P0 / (2 * lambda_a * S) * k

```

Après traitement des données, on obtient le réseau de courbes page suivante (**figure 10**).

**Q39.** Donner l'expression du pas de discrétisation temporelle  $h$  en fonction de  $\Delta t$  et  $N_t$ .



**FIGURE 10** – Évolution temporelle du champ de température dans la couche d'argile

**Q40.** Donner une estimation de la durée caractéristique  $\tau$  de diffusion thermique. Faire l'application numérique.

**Q41.** Justifier que  $\left. \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right|_{z_n, t_i} \approx \frac{\tilde{T}_{n+1}^i - 2\tilde{T}_n^i + \tilde{T}_{n-1}^i}{k^2}$ .

**Q42.** Quel est l'intérêt de la ligne 12 ? Que traduisent les lignes 15 et 20 ?

**Q43.** Compléter la ligne 19 sur votre copie.

**Q44.** Commenter le réseau de courbes obtenu. Quelle(s) critique(s) pourrait-on formuler au sujet des lignes de code proposées ?

### Problème 3 : MOXIE

Mars Oxygen ISRU Experiment, littéralement " expérience d'utilisation *in situ* des ressources en oxygène de Mars ", ou MOXIE, est un instrument du rover Perseverance. Il est destiné à démontrer la faisabilité de la production de dioxygène sur Mars par électrolyse à oxyde solide, appelée SOEC en anglais, du dioxyde de carbone qui constitue 95 % de l'atmosphère martienne. Le 20 avril 2021, MOXIE a produit un total de 5,4 g de dioxygène en une heure, ce qui peut permettre à un astronaute de respirer normalement pendant une dizaine de minutes. MOXIE aspire, compresse et chauffe les gaz atmosphériques martiens au travers d'un filtre, d'un compresseur à spirale et d'éléments chauffants isolés thermiquement, puis scinde le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  en dioxygène  $\text{O}_2$  et monoxyde de carbone  $\text{CO}$  par électrolyse à oxyde solide.

Une SOEC présente le fonctionnement inverse d'une pile à combustible à oxyde solide, appelée SOFC. Nous commencerons par l'étude d'une pile électrochimique classique pour comprendre le principe de fonctionnement de la pile à combustible, puis du module d'électrolyse MOXIE.

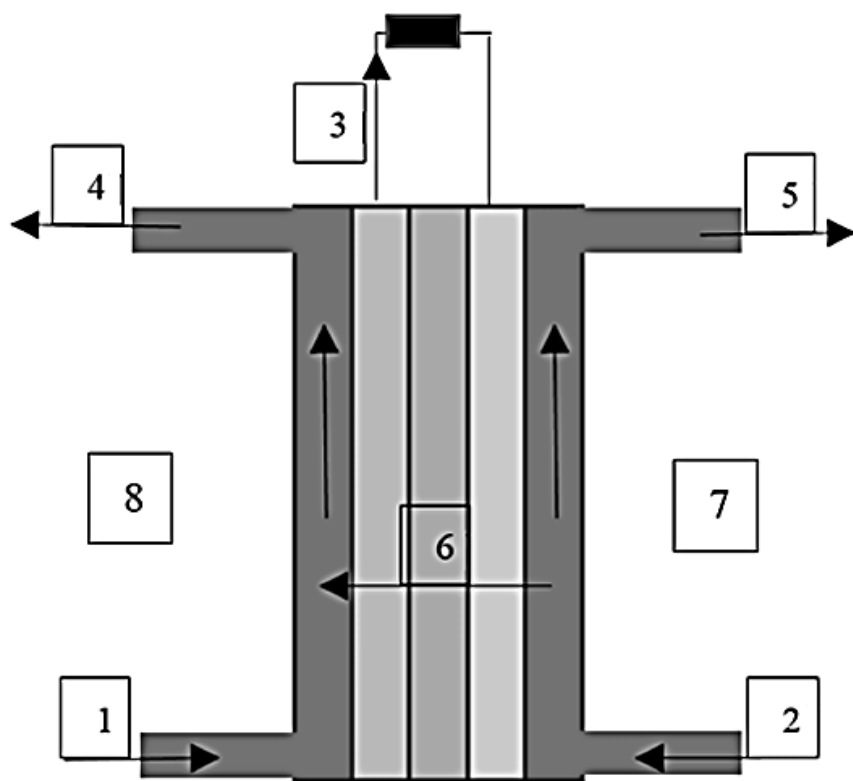
La pile classique considérée est constituée de demi-piles séparées par un pont salin : une électrode de zinc solide plongeant dans une solution ionique contenant les ions  $\text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})}$  et une électrode de cuivre solide plongeant dans une solution ionique contenant les ions  $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})}$ .

- Q52.** Réaliser un schéma de la pile électrochimique classique précédente.
- Q53.** Écrire les demi-équations se produisant à l'anode et à la cathode en précisant à chaque fois s'il s'agit d'une oxydation ou d'une réduction.
- Q54.** Indiquer le sens de circulation et la nature des porteurs de charge dans les fils électriques.
- Q55.** Quelle est la nature des porteurs de charge dans le pont salin ? Préciser le rôle de ce pont.
- La pile à combustible considérée est alimentée en dihydrogène gazeux  $\text{H}_{2(\text{g})}$  et dioxygène gazeux  $\text{O}_{2(\text{g})}$ . Les couples oxydo-réducteurs sont :  $\text{H}^{+}_{(\text{aq})}/\text{H}_{2(\text{g})}$  et  $\text{O}_{2(\text{g})}/\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$ . Le cœur de la pile est composé de deux électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte.
- Q56.** Le réactif oxydé est appelé le combustible de la pile. Parmi les espèces chimiques présentes dans les couples, laquelle constitue le combustible ?
- Q57.** Écrire les deux demi-équations d'oxydoréduction.

**Q58.** Écrire les formules de Nernst associées à ces deux couples (on considérera un fonctionnement à la température ambiante de 298 K).

**Q59.** Déterminer l'expression de la force électromotrice de cette pile.

Une variante de la pile à combustible étudiée ci-dessus est une pile à oxydes solides (SOFC en anglais), dans laquelle les ions oxyde  $O^{2-}$  migrent de la cathode alimentée en air vers l'anode alimentée en dihydrogène et où l'eau est produite. Une telle pile à combustible de type SOFC utilise comme oxyde solide la zircone stabilisée à l'yttrium (YSZ en anglais) correspondant à une substitution partielle d'ion zirconium par des ions yttrium dans l'oxyde  $ZrO_2$ .



**Figure 3 - Schéma de la pile à combustible SOFC**

**Q60.** Établir la correspondance entre les huit numéros du schéma de la **figure 3** et la liste suivante :  $H_{2(g)}$ , air (dont  $O_{2(g)}$ ),  $O^{2-}$ , électrons, anode, cathode,  $H_2O_{(l)}+H_{2(g)}$ , air appauvri.

**Q61.** La cathode constitue-t-elle le pôle positif ou négatif ? Justifier.

Dans un véhicule motorisé fonctionnant grâce à une pile à combustible, on estime à 1,5 kg la masse de dihydrogène nécessaire pour parcourir 250 km.

**Q62.** En considérant le dihydrogène comme un gaz parfait, calculer la quantité de matière de dihydrogène correspondant à cette masse, puis le volume occupé par cette quantité de gaz à 20 °C sous pression atmosphérique ( $p_{atm} = 1,0 \cdot 10^5$  Pa). Commenter la valeur obtenue.

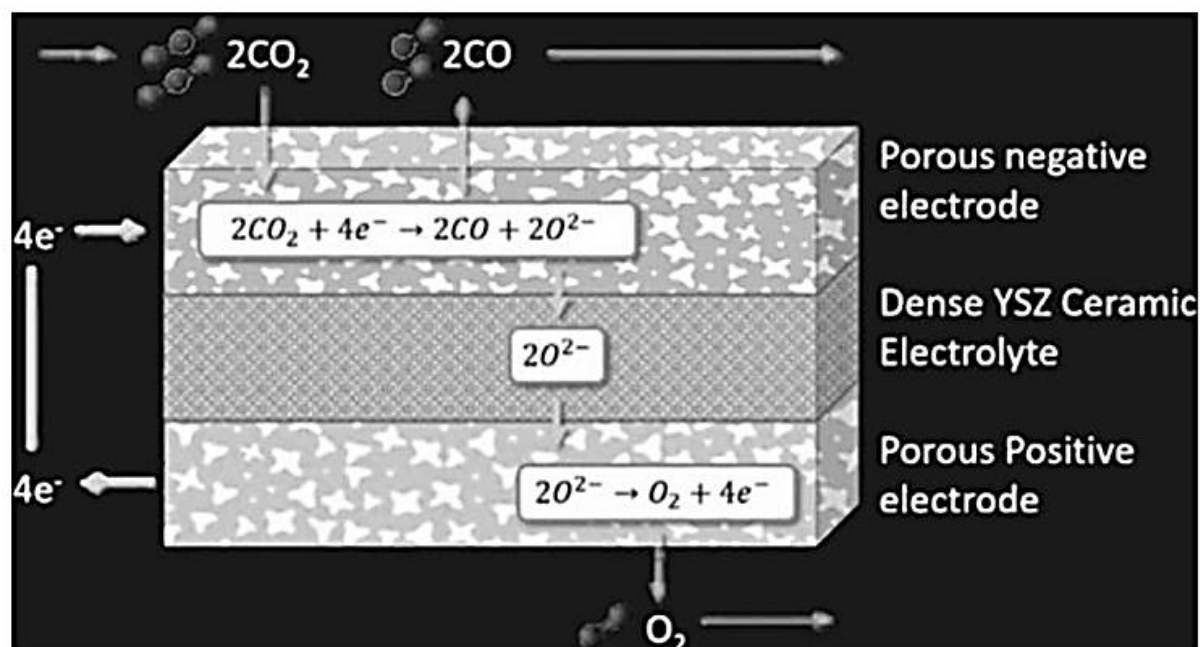
Il est à noter qu'aucune connaissance sur l'électrolyse n'est nécessaire pour répondre aux questions suivantes.

On considère maintenant l'électrolyse de l'eau  $H_2O_{(l)}$  qui correspond à la réaction inverse, c'est-à-dire à la formation par voie électrochimique d' $H_{2(g)}$ , ainsi que d' $O_{2(g)}$ , par l'application d'un courant électrique au travers de deux électrodes séparées par un électrolyte.

**Q63.** Donner l'équation de la réaction d'électrolyse de l'eau.

**Q64.** À partir du **document 6**, écrire l'équation de la réaction bilan de l'électrolyseur utilisant le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère martienne.

**Document 6 - Moxie**



Où YSZ désigne l'oxyde de zircon stabilisé à l'yttrium (substitution partielle d'ions zirconium par des ions yttrium dans l'oxyde  $\text{ZrO}_2$ )

Source : Meyen, FE, Hecht, MH et Hoffman, JA (2016).  
Modèle thermodynamique de l'expérience ISRU sur l'oxygène de Mars (MOXIE).  
Acta Astronautica

**Q65.** Dans quel but l'électrolyse du dioxyde de carbone peut-elle être mise en œuvre sur Mars ou dans la station spatiale internationale ?

**Données**

Constante de Faraday :  $9,65 \cdot 10^4 \text{ C}$

Constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Nombre d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Masse volumique moyenne de l'atmosphère terrestre :  $\rho = 1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse molaire de l'hydrogène :  $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Masse molaire du carbone :  $M(\text{C}) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Masse molaire de l'oxygène :  $M(\text{O}) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Potentiels standards :  $E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}_{(s)}) = -0,76 \text{ V}$   $E^\circ(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}_{(s)}) = 0,34 \text{ V}$

**-- FIN DE L'ENONCE --**